

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

Institut dopravy

**Rekonstrukce zásobníku paliva**

**Reconstruction of fuel silo**

Autor:

Bc. Bryndač Jiří

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Nečas, Ph.D.

Ostrava 2013

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jiří Bryndač**

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace:

35 Dopravní stroje a manipulace s materiálem

Téma:

**Rekonstrukce zásobníku paliva**  
**Reconstruction of Fuel Silo**

Zásady pro vypracování:

Na reprezentativním vzorku energetického uhlí proveďte posouzení jeho mechanicko-fyzikálních vlastností. V závislosti na výsledcích měření navrhnete úpravy zásobníku a optimalizaci toku paliva ze zásobníku. Zásobník je tvořen ocelovou konstrukcí obdélníkového půdorysu se zkosenými stěnami. Na tuto konstrukci navazuje plechová výsypka s výpustnými otvory nad redlerovými dopravníky. Vnitřní části zásobníku jsou tvořeny ocelovým plechem, který tvoří kontaktní materiál se skladovaným palivem.

- 1) Rešerši možných způsobů řešení optimalizace toku sypkých hmot.
- 2) Měření mechanicko-fyzikálních vlastností paliva.
- 3) Navrhnete vhodné opatření.
- 4) Proveďte potřebné technologické výpočty.
- 5) Proveďte potřebné konstrukční výpočty.
- 6) Konstrukční rekonstrukce zásobníku.

Seznam doporučené odborné literatury:

- Zegzulka, J.: Mechanika sypkých hmot. Ostrava: Laboratoř sypkých hmot, VŠB-TUO, 2004  
Jasaň, V.: Teória a stavba dopravníkov. Bratislava: TU Košice. Alfa Bratislava, 1984.  
Pešat, Z.: Manipulace v hutích. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1992.  
Fiala, J.: Strojnické tabulky. Praha: SNTL Praha, 1989.  
Firemní literatura a potřebné normy  
Metody měření a vyhodnocení měřených vzorků Laboratoře sypkých hmot. Ostrava: VŠB – TU Ostrava.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Nečas, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



---

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
*děkan fakulty*

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a zdroje.

V Ostravě 11.5.2015

.....

Podpis studenta

### **Prohlašuji, že**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было с́еднано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́еднано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 11.5.2015

.....

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jiří Bryndač

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Kopřivnice

Osvoboditelů 1236

74221

## **Poděkování**

Děkuji za pomoc a odborné rady mému vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Nečasovi, Ph.D. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studium na vysoké škole.

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

BRYNDAČ, J. Rekonstrukce zásobníku paliva: Diplomová práce.

Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní,

Institut dopravy, 2015, 58 s.

Vedoucí práce: Ing. Jan Nečas, Ph.D.

V diplomové práci jsem se zaměřil na problematiku pasivních a aktivních prvků zásobníků a také rekonstrukci zásobníku a optimalizování toku materiálu. Zásobník je umístěn v elektrárně Opatovice a je určen pro skladování černého uhlí, které dále putuje do fluidního kotle. V úvodu práce je změřen reprezentativní vzorek a na základě měření navrhnu varianty řešení. Poté jsou provedeny technologické a konstrukční výpočty pro určení základních parametrů zásobníku. V závěru je krátké technologické zhodnocení. V přílohách jsou uvedené sestavné a výrobní výkresy.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

BRYNDAČ, J. Reconstruction of fuel silo: Master thesis.

Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering,

Institute of Transport, 2015, 58 p.

Thesis head: Ing. Jan Nečas, Ph.D.

In my thesis I have focused on the issue of active and passive elements of the silo, reconstruction of the silo and about optimizing the flow of materials. The silo is located in Opatovice power plant and is intended for the storage of coal which continues into the fluidized boiler. The beginning of the thesis focuses on measuring of representative sample and individual variants are designed based on measurement results. Then Further technological and design calculations are made to determine the basic parameters of the silo. The end of this thesis contains a brief technology assessment. The annexes contains manufacturing and assembly drawings.

## Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek .....	10
1. Úvod.....	13
2. Zásobníky.....	14
2.1. Rozdělení zásobníků .....	15
3. Tokové profily .....	16
3.1. Hmotový tok .....	16
3.2. Jádrový tok .....	17
3.3. Poruchy toku materiálu .....	18
3.4. Jenikeho křivky .....	19
4. Aktivní a pasivní prvky zásobníků .....	20
4.1. Aktivní prvky .....	20
4.1.1. Mechanické prvky .....	20
4.1.2. Vibrační prvky .....	21
4.1.3. Pneumatické prvky .....	22
4.1.3.a) Pneumatické kuličkové vibrátory .....	22
4.1.3.b) Vzduchové děla .....	23
4.1.3.c) Pulsní a nožové trysky.....	24
4.1.3.d) Provzdušňovací kužely .....	25
4.2. Pasivní prvky .....	26
4.2.1. Obrácený kužel.....	26
4.2.2. Použití více výsypek .....	27
4.3. Rozložení tlaku blízko pasivního prvku dle Enstada .....	27
4.4. Rozložení tlaku v blízkosti pasivního prvku dle Strusche .....	29
5. Měření reprezentativní vzorku.....	30
5.1. Úhel vnitřního tření .....	31
5.2. Úhel vnějšího tření .....	32
6. Popis technického stavu.....	33
7. Varianty řešení .....	34
7.1. Současný stav .....	34
7.2. Varianta 1 .....	34
7.3. Varianta 2 .....	35
7.4. Varianta 3 .....	35
7.5. Výběr varianty .....	36



8.	Technologické výpočty .....	37
9.	Konstrukční výpočet .....	47
10.	Pasivní vestavba zásobníku .....	53
11.	Technický popis .....	56
12.	Závěr .....	57
13.	Použitá literatura .....	58
14.	Seznam příloh.....	59

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Název	Jednotka
D	Průměr výpustného otvoru	[m]
F	Síla na čep	[N]
$F_1$	Jansenová síla ve výpusti	[N]
$F_{1u}$	Jansenová síla do uzávěru	[N]
$F_{kl}$	Síla, která drží klenbu	[N]
$F_o$	Osová síla šroubu	[N]
G	Tíha šoupátka	[N]
$G_2$	Tíha jedné větve řetězu včetně hřebel	[N]
$G_{kl}$	Tíha klenbu	[N]
K	Celkový odpor proti otvírání	[Pa]
$K_1$	Odpor ve vedení řetězu	[N]
$K_2$	Odpor z tření na bočním vedení a dně podavače	[N]
$K_3$	Odpor z trhání materiálu	[N]
$K_c$	Síla z bezpečnostní přirážky pro nezahrnuté přirážky	[N]
$K_r$	Celkový odpor proti pohybu redleru	[N]
$K_{stř}$	Střední odpor proti otvírání	[N]
L	Délka jedné větve	[m]
$M_k$	Krouticí moment	[Nm]
$M_o$	Ohybový moment	[Nm]
O	Obvod výpustného otvoru	[m]
P	Výkon elektromotoru	[W]
$P_z$	Stoupání závitu	[m]
Q	výtok materiálu z výpustného otvoru	[t/hod]
R	Hydraulický poloměr	[m]
$R_e$	Mez kluzu	[Pa]
$R_{min}$	Minimální hydraulický poloměr	[m]
S	Plocha závitu a dříku šroubu	[m <sup>2</sup> ]
$S'$	Obsah výpustného otvoru (uzávěru)	[m <sup>2</sup> ]
$S_{\check{c}}$	Obsah plochy čepu	[m <sup>2</sup> ]
V	Objem šoupátka	[m <sup>3</sup> ]
$W_k$	Modul průřezu v krutu	[m <sup>3</sup> ]
$W_o$	Modul průřezu ohybu	[m <sup>3</sup> ]
$Z_v$	Konstanta vlačovacího mechanismu toku	[-]
a	Délka výpustě	[m]
$a_{\check{c}}$	Šířka vidlice	[m]

b	Šířka výpustného otvoru	[m]
$b_{\check{c}}$	Šířka šoupátka	[m]
$b_{min}$	Minimální šířka výpustného otvoru	[m]
$b_z$	Průchod maximálního zrna	[m]
c	Bezpečnostní přírážka pro nezahrnuté odpory	[-]
$c_1$	Opravný koeficient zahrnující vliv pohybu zrn	[-]
$d_2$	Střední průměr závitu	[m]
$d_3$	Malý průměr závitu	[m]
$d_{\check{c}}$	Průměr čepu	[m]
$d_{max}$	Rozměr maximálního zrna	[m]
f	Koeficient dynamického tření	[-]
$f_1$	Koeficient tření mezi mat. a šoupátkem	[-]
$f_2$	Koeficient mezi otěrovými lištami	[-]
$f_3$	Koef. tření mezi řetězy a vodícími lištami řetězu	[-]
$f_4$	Tření mezi boční stěnou, žlabem a materiálem	[-]
$f_z$	Součinitel smykového tření v závitech	[-]
g	Gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
h	Výška podávaného materiálu	[m]
$h_2$	Výška materiálu nad hřebem	[m]
$h_v$	Výška klenby	[m]
i	Poměr šířky a délky výpustného otvoru	[-]
$i_{\check{s}}$	Počet šroubů držící šoupátkový uzávěr	[-]
k	Koeficient synnosti	[-]
$k_c$	Koeficient provozní bezpečnosti	[-]
$k_d$	Koeficient dynamický	[-]
$k_o$	Koeficient závěsu	[-]
$k_s$	Koeficient bezpečnosti pro šroub	[-]
l	Délka výpustného otvoru	[m]
m	Hmotnost zvoleného elementu	[kg]
$m_{\check{s}oup}$	Hmotnost šoupátka	[kg]
$m_v$	Hmotnost řetězu včetně hřebel na metr délky	[kg/m]
$p_{\check{c}1}$	Tlak působící na vidlici držící čep	[Pa]
$p_{\check{c}2}$	Tlak působící na šoupátko držící čep	[Pa]
$p_D$	Dovolený tlak	[Pa]
v	Rychlost redlerového podavače	[m/s <sup>1</sup> ]
$v_o$	Výtoková rychlost	[m/s <sup>1</sup> ]
$\Delta h$	Výška zvoleného elementu	[m]
$\alpha$	Úhel profilu závitu	[°]
$\gamma_s$	Sypná tíha	[N/m <sup>3</sup> ]

$\eta$	Účinnost redlerového podavače	[-]
$\lambda$	Koeficient výtoku	[-]
$\pi$	matematická konstanta (Ludolfovo číslo)	[-]
$\rho_{oc}$	Hustota oceli	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Sypná hmotnost materiálu	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_0$	Ohybové napětí	[Pa]
$\sigma_D$	Dovolené ohybové napětí	[Pa]
$\sigma_{red}$	Redukované napětí	[Pa]
$\tau_0$	Počáteční soudržné napětí	[Pa]
$\tau_D$	Dovolené smykové napětí	[Pa]
$\tau_k$	Napětí v krutu	[Pa]
$\tau_s$	Smykové napětí	[Pa]
$\varphi$	Úhel vnitřního tření	[°]
$\varphi'_z$	Redukovaný třecí úhel	[°]
$\psi$	Koeficient rozvolnění	[-]
$\psi_s$	Statický sypný úhel	[°]
$\psi_z$	Úhel stoupání v závitu	[°]

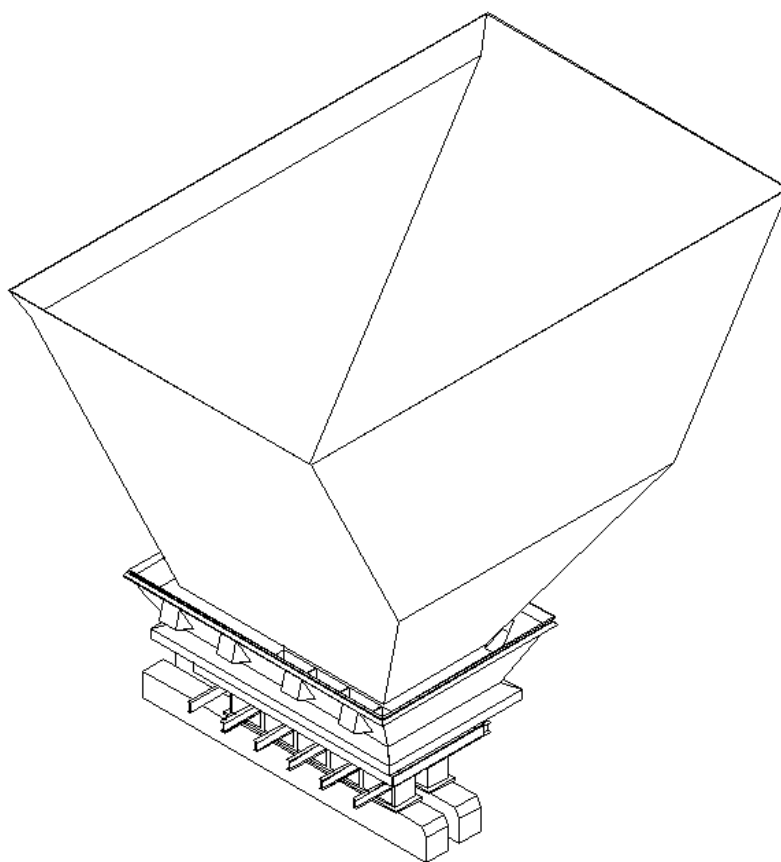
## 1. Úvod

Cílem diplomové práce je navrhnout úpravy zásobníku a optimalizaci toku materiálu ze zásobníku na redlerový dopravník. Dále na reprezentativním vzorku černého uhlí zjistí mechanicko-fyzikální vlastnosti materiálu.

V úvodu diplomové práce jsem zpracoval rešerši, kde je základní rozdělení zásobníků, Pokračuje rozdělením hmotových toků a vypsání nejčastější problémy toku materiálu ze zásobníku. V rešerši jsem také zpracoval rozdělení a seznámení s aktivními a pasivními prvky. Součástí diplomové práce bylo měření mechanicko-fyzikálních vlastností vzorku odebraného z elektrárny Opatovice. Měřil jsem úhel vnitřního, vnějšího tření a maximální velikost zrna. V další části je technický popis a varianty řešení zásobníku s vyhodnocením finální varianty. Po výběru varianty jsem provedl technologické výpočty zásobníku a konstrukční výpočty namáhaných součástí. V závěru jsem provedl technické zhodnocení daného problému a zhotovil sestavné a výrobní výkresy.

## 2. Zásobníky

Zásobníky jsou nádrže geometrických tvarů. Hlavním účelem zásobníku je uskladňování sypkých materiálů, ale také zrovnoměnění navazujících technologických operací a optimalizaci dopravního systému. Zásobníky dělíme do dvou velkých skupin a to jsou buď bunkry, kde délkový rozměr je vždy mnohonásobně větší než výškový a druhý příklad jsou sila a u těch platí, že jejich výška je mnohonásobně vyšší než šířka nebo průměr. Zásobníky sypkých hmot mohou být železobetonové, ocelové nebo hornické.



*Obr. 1. Zásobník*

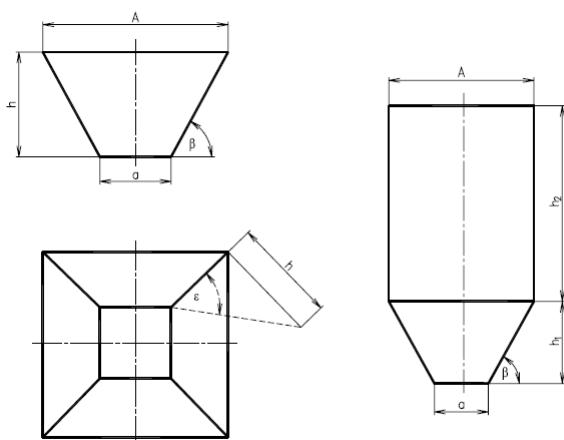
## 2.1. Rozdělení zásobníků

-Dle funkce

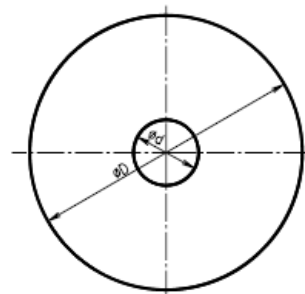
- zásobníky pravé (určené primárně pro skladování materiálu)
- zásobníky nepravé (určené pro jinou funkci- vagóny, vlečky, skluzu)

-Dle provedení

- zásobníky konstrukční- pravoúhlé (jehlancovité)
- kruhové (kuželovité)

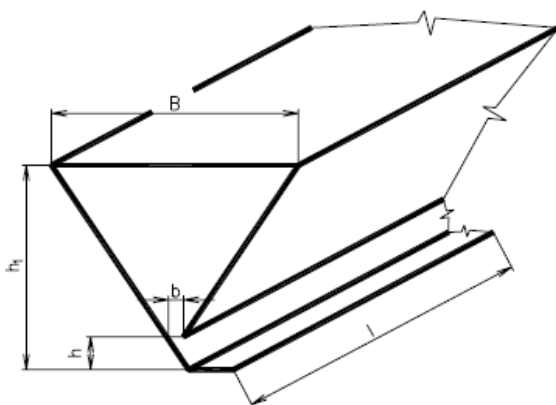


Obr. 2. Pohledy pravoúhlého zásobníku



Obr. 3. Půdorys kruhového zásobníku

- zásobníky štěrbinové - hornické (svislé, šikmé a rýhové)
- zásobníky dopravníkové



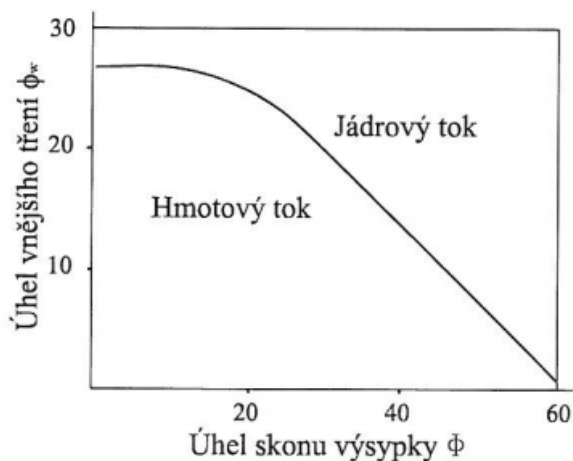
Obr. 4. Štěrbinový zásobník



Obr. 5. Dopravníkový zásobník [10]

### 3. Tokové profily

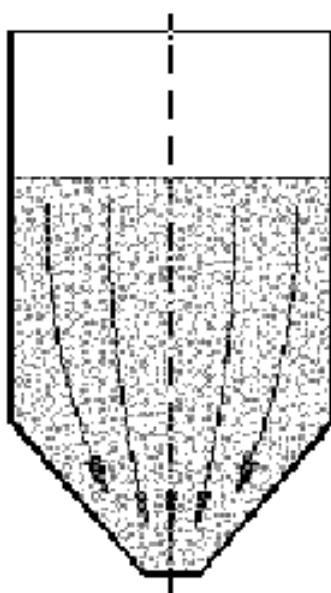
Tok sypké hmoty v zásobníku závisí na mnoha faktorech materiálu a na tvaru zásobníku. Tok materiálu v zásobníku rozdělujeme na jádrový a hmotový.



Obr. 6. Křivka mezi hmotovým a jádrovým tokem

#### 3.1. Hmotový tok

Nejvýhodnější a také nejméně energeticky náročný. Vrstvy, které vznikají při vysypávání materiálu ze zásobníku, tvoří tzv. izolinie (křivky stejného napětí) a jsou při vyprazdňování stále rovnoběžné. Jednoduše řečeno, že materiál ze zásobníku vypadává postupně dle toho, jak ho tom nalíváme. Hmotového toku dosáhneme překonáním tření ve výsypce, dostatečnou velikostí výpustného otvoru a překonání kohezní síly.

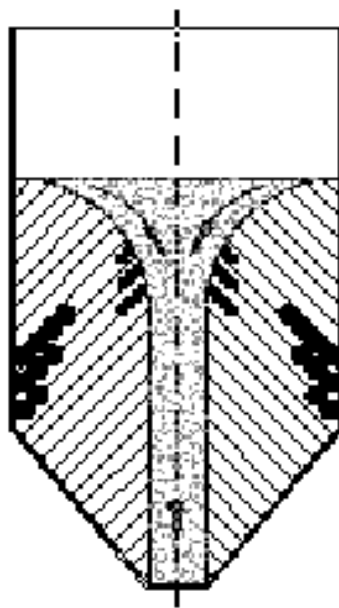


Obr. 7. Řez zásobníku s hmotovým tokem



### 3.2. Jádrový tok

Také můžeme nazývat nálevkový pro jeho tvar, kdy na stěnách zásobníku zůstává materiál a vznikají tzv. mrtvé zóny, což jsou oblasti bez pohybu materiálu. Materiál se poté chová při vyprazdňování jako trychtýř. Při jádrovém toku, materiál který nasypávám jako poslední okamžitě putuje k výpustnému otvoru a následně ven. Tenhle případ může vzniknout při malém zkosení ve spodní části zásobníku nízkou abrazí materiálu se stěnou.



*Obr. 8. Řez zásobníku s jádrovým tokem*

### 3.3. Poruchy toku materiálu

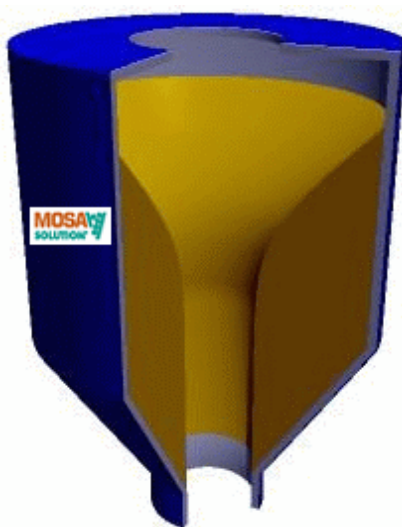
Při toku materiálu může také docházet k různým poruchám toku, například klenba, oblouk, komín, segregace materiálu.

Klenba nám vzniká tehdy, kdy síla která drží klenbu, je větší než tíha materiálu nad výpustným otvorem.



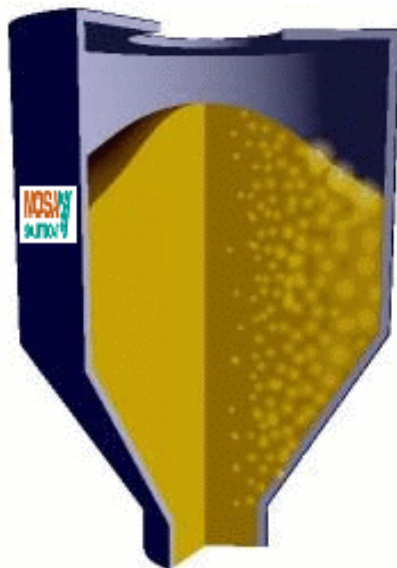
Obr. 9. Klenba nad výpustným otvorem [7]

Komín, taky jako jádrový tok, vzniká tehdy, kdy materiál upívá na stěnách zásobníku. Jednoduše řečeno, že vsypaný materiál do zásobníku jako poslední, opouští zásobník jako první a vznikají po stěnách mrtvé zóny materiálu.



Obr. 10. Tvorba jádrového toku [7]

Segregace materiálu vzniká hlavně u nehomogenního materiálu. Na stěnách zásobníku se usazuje materiál. Při plnění zásobníku se velké částice materiálu shlukují na okraji zatím co malé částice ve středu zásobníku. Tento efekt je nepříjemný hlavně v případě, kdy je důležitá homogenita dané směsi.



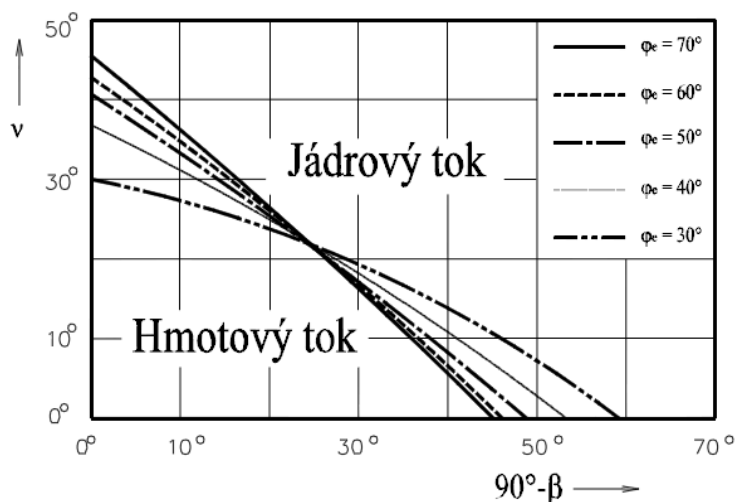
Obr. 11. Segregace materiálu [7]

### 3.4. Jenikeho křivky

Pomocí grafu jde určit pro konkrétní skladovaný materiál vnitřní materiál výsypky a tvar zásobníku aby sypká hmota tekla pouze hmotovým tokem.

Křivky grafu znázorňují efektivní úhel vnitřního tření materiálu dle legendy v grafu.

Svislá osa ukazuje úhel vnějšího tření a horizontální osa úhel sklonu zásobníku.



Obr. 12. Jenikeho křivky

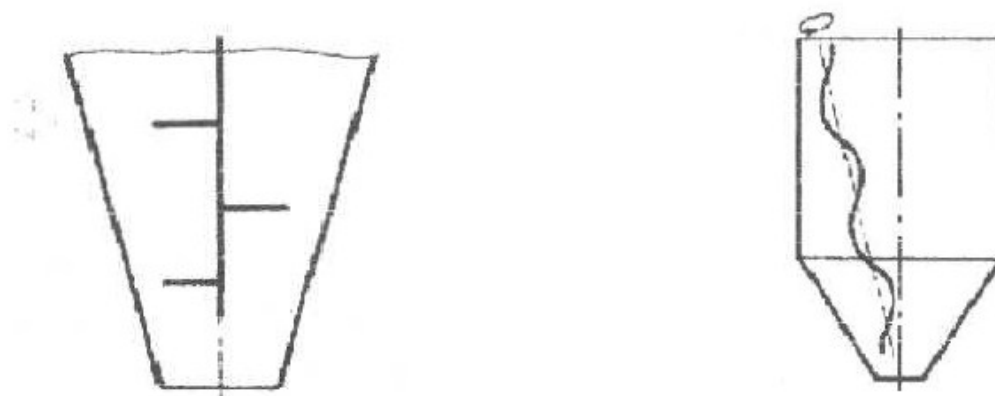
## 4. Aktivní a pasivní prvky zásobníků

K prevenci, aby nedocházelo ke zmiňování poruchám toku materiálu, nebo k odstranění jmenovaných problémů používáme aktivní nebo pasivní prvky zásobníku. Jsou to prvky pro rozbití vazeb materiálu nebo provzdušnění. Aktivní prvky rozdělujeme na mechanické, vibrační, pneumatické. K pasivním prvkům řadíme například kuželovou vestavbu, použití více výsypek, pevnou ocelovou kapsu.

### 4.1. Aktivní prvky

#### 4.1.1. Mechanické prvky

Jsou umístěné většinou vevnitř zásobníku. Patří k nim například otočné vestavby, které zkyprují materiál a také šnekové nože.



*Obr. 13. Umístění mechanických prvků v zásobníku*

### 4.1.2. Vibrační prvky

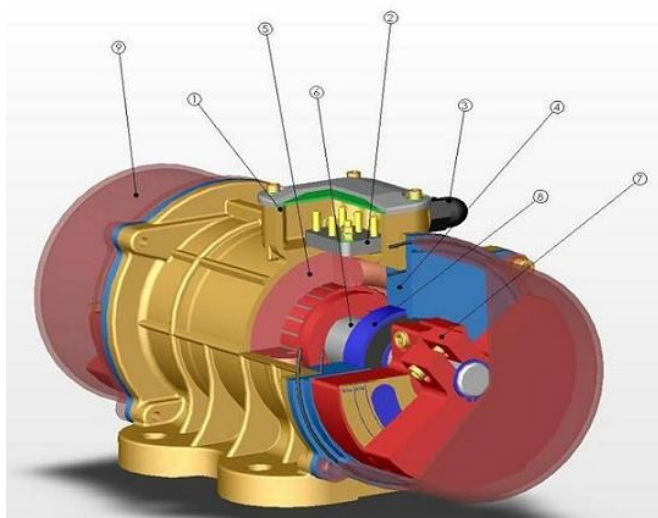
Vibrační prvky nejsou moc dobrou variantou z důvodu velkého namáhání celkového zásobníku a hlavně výsypky. Mezi vibrační aktivní prvky patří vibrační výsypka a různé typy vibrátorů.



Obr. 14. Vibrační výsypka[9]

-vibrátory

Upevňujeme buď jako pohon pro vibrační výsypku, nebo samostatně na nepohyblivou výsypku, kde nám umožní při ořesu uvolnit materiál, který ulpěl na stěnách zásobníku. Nevýhodou je jak už bylo zmíněno velké namáhání zásobníku ale také i hlučnost.



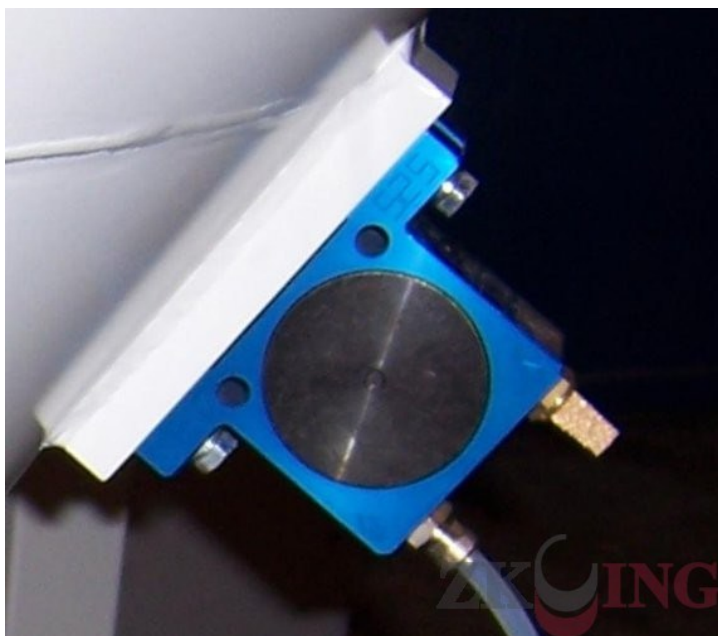
Obr. 15. Vibrační pohon [11]

### 4.1.3. Pneumatické prvky

Pneumatické prvky jsou nejrozšířenější skupinou aktivní prvků. Řadíme zde i vibrátory ale pouze pneumatické, dále také vzduchová děla, pulsní a nožové trysky, provzdušňovací desky.

#### 4.1.3.a) Pneumatické kuličkové vibrátory

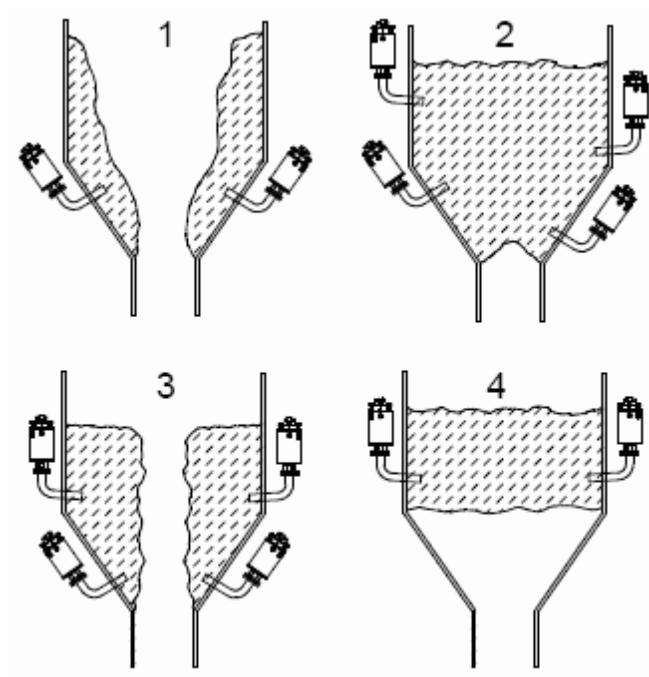
Používá se pro uvolnění sypkého materiálu, který ulpěl na stěnách zásobníku, a který se při intenzivním setřásání nezhutňuje. Princip je při přívodu vzduchu do komory vibrátoru, kde je umístěna kulička, se rozkmitá. Vibrátor je pevně připevněn na zásobníku.



*Obr. 16. Kuličkový pneumatický vibrátor [9]*

#### 4.1.3.b) Vzduchové děla

Používáme na podpoření volného toku materiálu v zásobnících a silech. Objem zásobníku vzduchového děla prudce expanduje do prostoru s blokováním materiálem a tím uvolní materiál, který pak proudí dále ze zásobníku. Vzduchové dělo používáme s pracovním tlakem 0,6 MPa. Vzduchové dělo může pracovat v teplotách od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+90^{\circ}\text{C}$ . Je umístěno přímo na zásobníku pomocí příruby s trubicí, která vede do prostoru zásobníku. Většinou umísťujeme více děl po obvodu, ale i v jiných výškách.



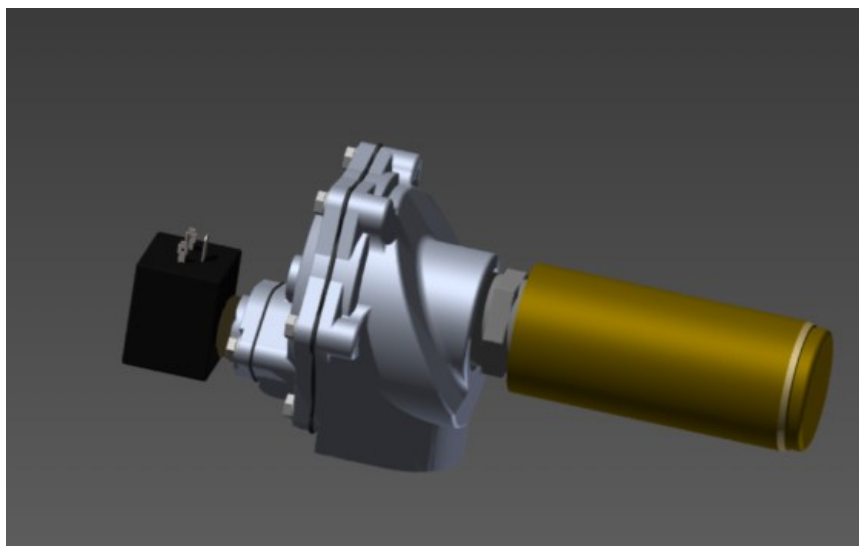
Obr. 17. Umístění vzduchových děl [8]



Obr. 18. Vzduchové dělo [8]

#### 4.1.3.c) Pulsní a nožové trysky

Systém slučující sílu přetlakového vzduchu se systémem kontrolovaného dávkování. Používají se všude tam, kde je zapotřebí jednoduchá a rychlá montáž anebo není přímo do zásobníku možný přístup. Trysky se aplikují přímo z venku na stěnu zásobníku.



*Obr. 19. Pulzní tryska VA-51 [7]*



*Obr. 20. Realizace pulzních trysek [7]*



#### 4.1.3.d) Provzdušňovací kužely

Jde o kombinaci vzduchového a vibračního čření práškových nebo granulovaných materiálů. Vzduch se může přivádět pod tlakem od 0,8 do 4 barů. Prakticky fungují na stejném principu jako pulzní trysky.



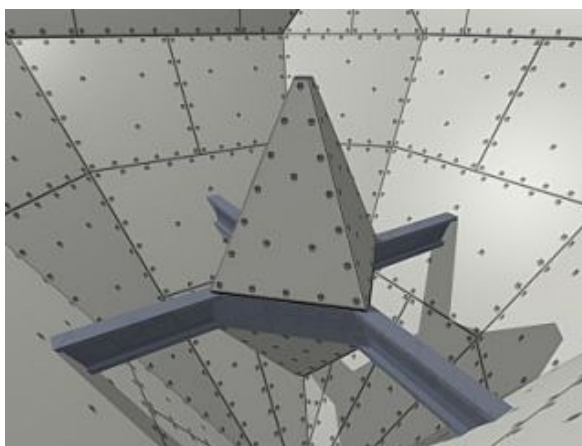
*Obr. 21. Funkce provzdušňovacího kužele[11]*

## 4.2. Pasivní prvky

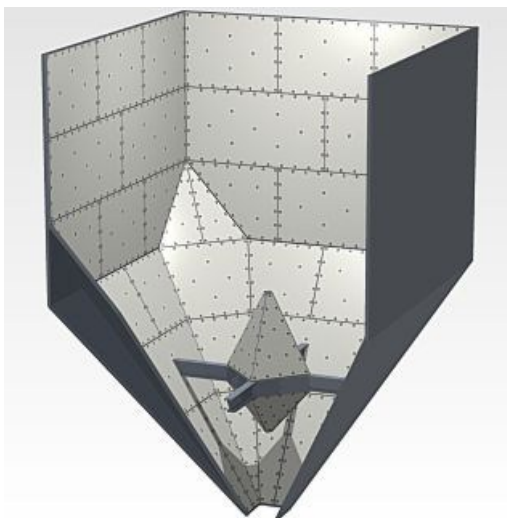
Za pasivní prvky označujeme tělesa umístěna do vnitřního prostoru zásobníku, který nemají další zdroj energie. Díky uchycené na vlastní ocelovou konstrukci jej lze aplikovat v betonových i ocelových zásobnicích aniž by zatěžovala spodní část zásobníku. Velikost pasivního prvku závisí na velikosti zásobníku a výpustného otvoru a vlastnosti skladovaného materiálu. Ve většině případu jsou prvky kombinovány s aktivními prvky.

### 4.2.1. Obrácený kužel

Používáme pro rozbití vazeb, aby se nám netvořila klenba nad výsypkou. Je to kužel svařený s plechů umístěný nad výsypkou na konstrukci, která je přivařena k zásobníku.



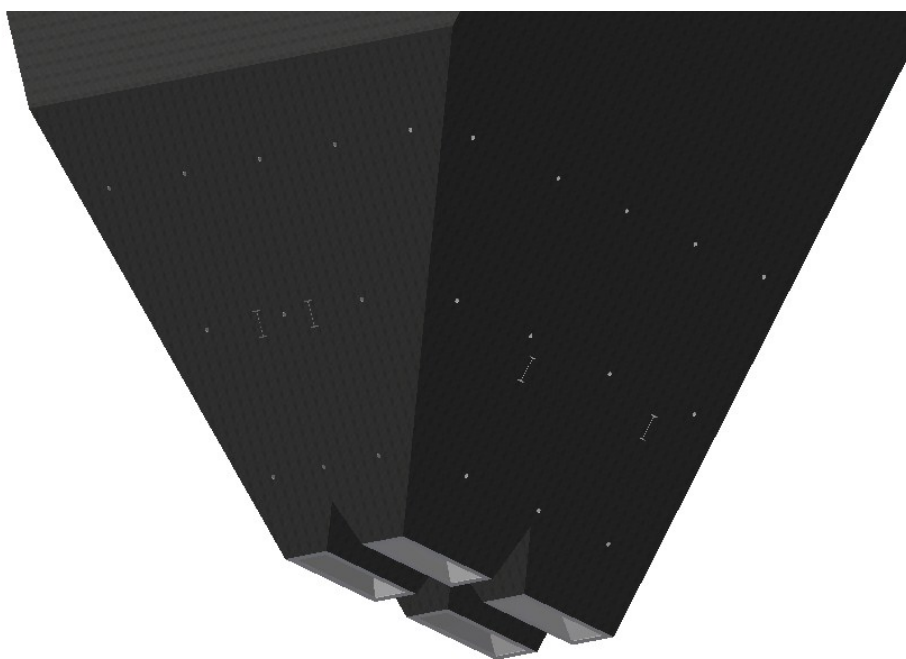
Obr. 22. Tvar pasivního prvku Crystalen® [14]



Obr. 23. Umístění pasivního prvku v zásobníku [14]

### 4.2.2. Použití více výsypek

Při použití více výsypek rozdělíme jednu velkou sílu, která nám například drží klenbu na menší. To nám může pomoci s odstraněním problému toku materiálů. Většinou použijeme ještě pasivní prvek nad výsypkou nebo společně s aktivním prvkem.



*Obr. 24. Zásobník s více výsypkami*

### 4.3. Rozložení tlaku blízko pasivního prvku dle Enstada

Výpočet tlaku v blízkosti pasivních prvků u většiny autorů vychází stejně jako při výpočtu napětí ve výsypce – z porovnání sil, které působí na element materiálu vytčený mezi stěnou zásobníku a pasivním prvkem. Enstadova rovnice řeší rovnováhu sil podle obr. 25. Za následujících předpokladů:

- Rovinný stav napjatosti (rotační nebo štěrbinový zásobník)
- Pasivní stav napjatosti
- Neměnné tlaky na povrchu elementu
- Větší hlavní tlak působí normálně a menší hlavní tlak působí tečně k povrchu elementu
- Úloha je symetrická

Řešení diferenciální rovnice silové rovnováhy vychází:

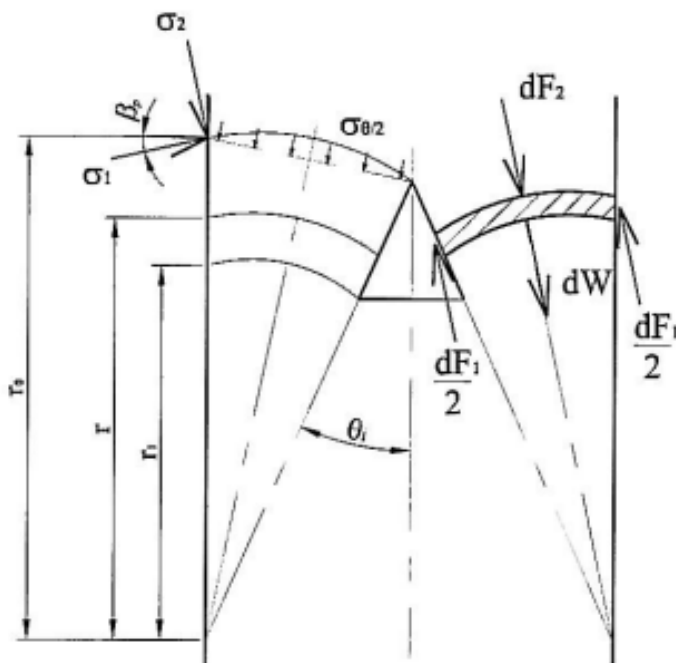
$$\sigma(r) = \frac{\rho_s g Y r}{X-1} + \left( \sigma_0 - \frac{\rho_s g Y r}{X-1} \right) \cdot \left( \frac{r}{r_0} \right)^X$$

Kde platí

$$X = \frac{\sin \varphi_e}{1 - \sin \varphi_e} \cdot \left( 1 + \frac{\sin \cdot (2\beta + \frac{\theta_i}{2})}{\sin \frac{\theta_i}{2}} \right) \cdot \left( \frac{r}{r_0} \right)^X$$

$$Y = \frac{\sin \beta_p \sin \left( \beta_p + \frac{\theta_i}{2} \right) + \left( \beta_p + \frac{\theta_i}{2} \right) \sin \frac{\theta_i}{2}}{(1 - \sin \varphi_e) \sin^2 \left( \beta_p + \frac{\theta_i}{2} \right)}$$

a  $\sigma_{\theta_i/2}$  je napětí působící normálně na element od vyšších vrstev materiálu. Podle [4] je dosti vhodný výpočet svrchních tlaků podle Janssena, dokonce ani zanedbání odchylky v směrech působení napětí  $\sigma_{\theta_i/2}$  od svislice neznamena významnou chybu. Ostatní označení je zřejmé z obr. 25.



Obr. 25. Silová rovnováha na elementu materiálu v blízkosti pasivního prvku

#### 4.4. Rozložení tlaku v blízkosti pasivního prvku dle Strusche

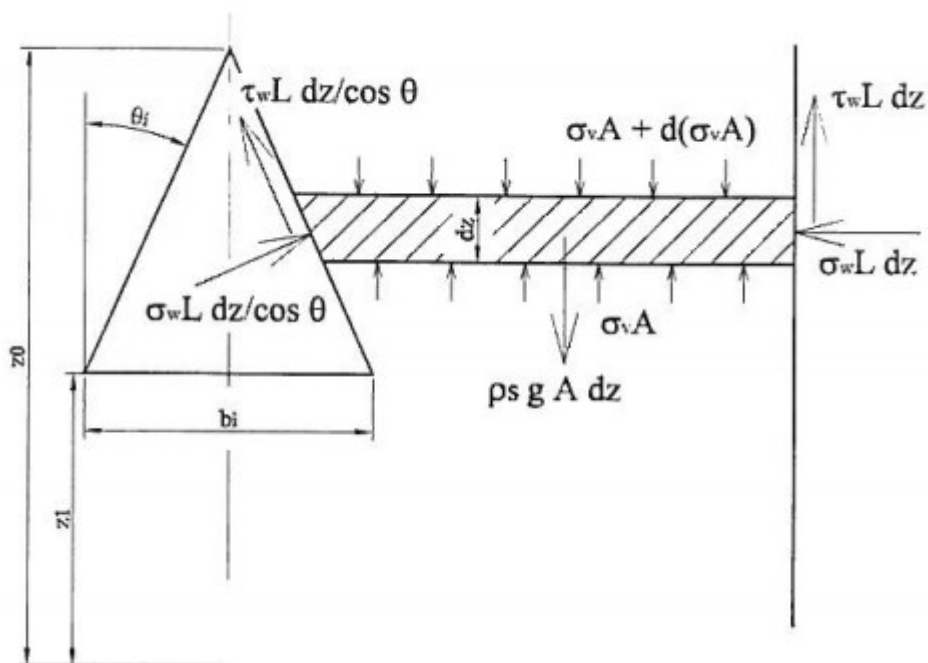
Také Strusch ve svém odvození napjatosti vychází z elementární vrstvy. Schéma sil a napětí je naznačeno na obr. 26, při odvození bylo uvažováno s následujícími předpoklady:

- Zásobník je obdélníkového průřezu
- Materiál je homogenní
- Působí vertikální tlak
- Zanedbává se vliv nesymetrie a boční stěn výsypky

Řešení silové rovnováhy se pro svislý tlak v blízkosti pasivních prvků dostane:

$$\sigma_v = \frac{\rho_s g z}{n_i - 1} + \left( \sigma_{v0} - \frac{\rho_s g z}{n_i - 1} \right) \cdot \left( \frac{z}{z_0} \right)^{n_j}$$

Kde  $\sigma_{v0}$  je napětí počítané podle Janssena. Konstanty  $n_i$  a  $n_j$  jsou závislé na koeficientu sypnosti v daném místě, tření na stěně a tvaru pasivního prvku.



Obr. 26. Silová rovnováha na elementu materiálu v blízkosti pasivního prvku

## 5. Měření reprezentativní vzorku

Měřený vzorek byl odebrán z elektrárny Opatovice. Jedná se o černé uhlí, které je ukládáno v zásobníku a dále přes redlerový podavač doplňován do fluidního kotle. Na vzorku jsme měřili vnitřní a vnější úhel, jeho největší zrno. Vzorek jsme měřili v laboratořích sybkých hmot na VŠB-TU Ostrava.

Největší element měřeného materiálu byl změřen na 40 mm v průměru. Uskladňovaný materiál je nehomogenní.



*Obr. 27. Měřený reprezentativní vzorek*

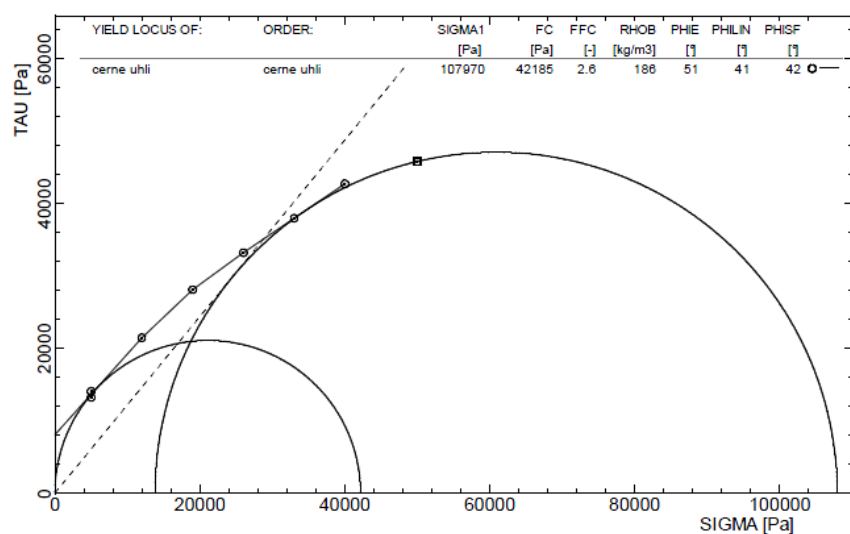
## 5.1. Úhel vnitřního tření

Je úhel, který vzniká třením částic uvnitř materiálu.

Měření vnitřního úhlu bylo provedeno rotační smykovou zkouškou. Do cely jsme nasypali materiál tak aby byl zároveň s okrajem cely. Dále jsme vzorek (materiál) zatížili smykovou hlavou a normálovou silou, kde čepele cely zajedou do měřeného vzorku. Smyková hlava se poté začíná pomalu otáčet a tím vyvolává v materiálu smykové napětí. Hodnoty převádí rovnou do určeného programu a ten vyhodnocuje stav měření. Výstup měření je součástí diplomové práce a je uvedené v přílohách.



Obr. 28. Rotační smykový stroj SCHULZE

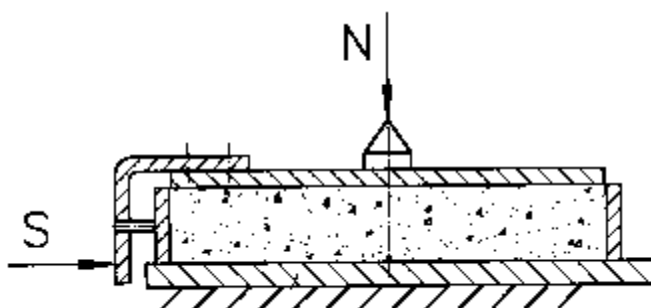


Obr. 29. Mohrová kružnice pro úhel vnitřního tření

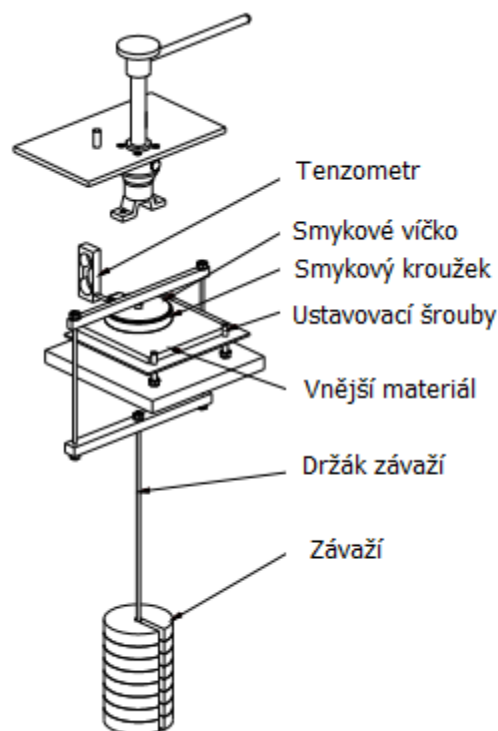
## 5.2. Úhel vnějšího tření

Úhel, který vzniká mezi měřeným materiálem a stěnou zásobníku.

Měřili jsme na Jenikeho smykovém stroji, kde jsme do cely taktéž nasypali materiál. Cela byla posazena plechové desce ze stejného materiálu jako zásobník. Dále jsme materiál přikryli víkem a zatížili normálovou silou. Normálovou sílu nám zajišťuje závaží, které jsou zavěšené na víku a to zároveň přitlačuje materiál k ocelovému plechu, který znázorňuje materiál zásobníku. Při spuštění stroje nám hrot stroje působí na kroužek a ten se pomaličku posouvá po ocelovém plechu. Postupně odebíráme závaží po 4. Vždy měříme až do doby, kdy se křivka grafu měření neustálí v přímku a dále odebíráme 4 závaží. Celkově máme 16 závaží. Hodnoty nám zpracovává PC. Výstup měření je součástí diplomové práce a je uvedené v přílohách.



Obr. 30. Znázornění měření úhlu vnějšího tření

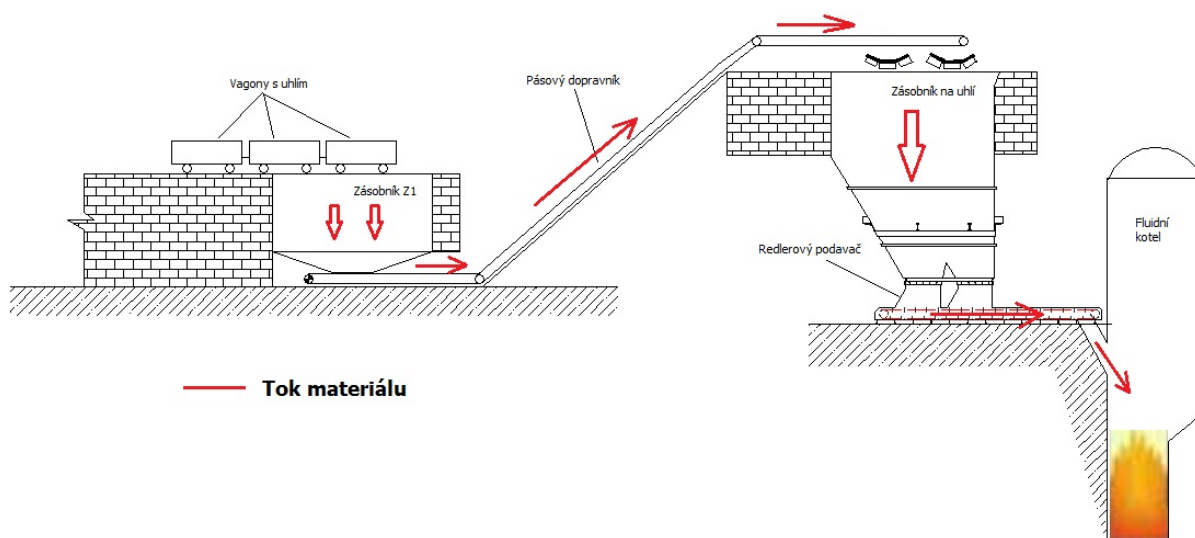


Obr. 311. Znázornění měření úhlu vnějšího tření



## 6. Popis technického stavu

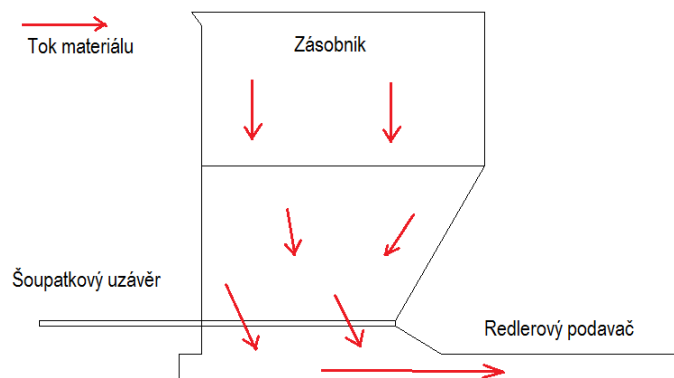
Materiál je přivezen pomocí vlečky který plní zásbník Z1. Pomocí pásového dopravníku dopravíme uhlí do železobetonového zásobníku, který zásobuje fluidní kotel (mnou řešený zásobník). Zásobník je vysoký 10 m a dokáže pojmout 508 m<sup>3</sup> uhlí. Pro lepší tok materiálu je v zásobníku umístěné kuželový pasivní prvek a na stěnách zásobníku jsou umístěné pulzní trysky. Část zásobníku je umístěná v benové konstrukci samotného stavení. Pod zásobníkem je navařen rám, na kterém je šroubovým spojem připojen pneumatický šoupatkový uzávěr. Celý zásobník stojí na redlerových podavačích, které jsou pevně spojeny s I profily a dále položené na podlahu stavení. Tok materiálu putuje v redleru z počátku přes vrchní větev a následně přepadává do spodní větve a putuje do fluidního kotle.



Obr. 32. Dispoziční řešení

## 7. Varianty řešení

### 7.1. Současný stav

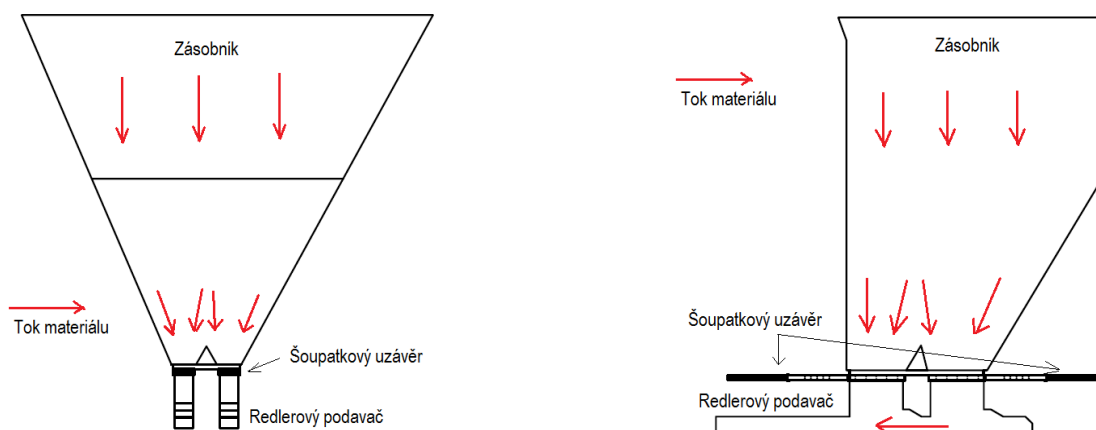


Obr. 333. Bokorys zásobníku a znázornění toku materiálu

V současném stavu je použitý železobetonový zásobník s jedním výpustným otvorem. Byl použit šoupatkový uzávěr a redlerový podavač. U současného stavu vzniká nevyhovující síla nad výsypkou a také tvoření klenby nad výsypným otvorem. Všechny ostatní varianty vycházejí s původního tvaru zásobníku.

### 7.2. Varianta 1

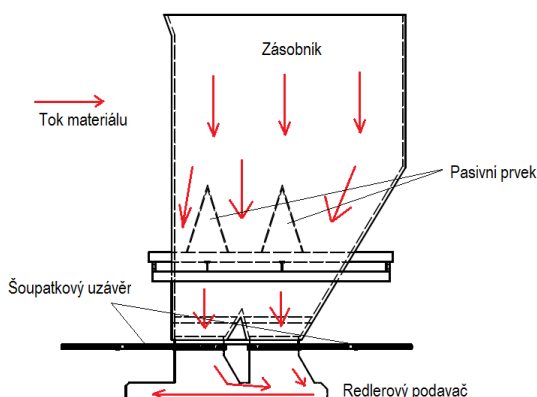
U varianty 1 jsem navrhnul čtyři výpustné otvory jak je zřejmé z obr. 33 a z obr. 34, které plní dva redlerové podavače, dále do kotle. O potřebné množství materiálu vsypané přes redlerový podavač do kotle se stará pneumatické šoupatkové uzávěry. Po předběžném vypočtení technologických výpočtů, se vytváří i u této varianty klenba a tíha materiálu nad klenbou není dostačující k jejímu samovolnému odstranění. Také nám vzniká podobný problém jako u současného stavu, že zda je zásobník plně naplněn je tíha materiálu nad výpustným otvorem nepřiměřeně velká.



Obr. 344. Nárys a bokorys zásobníku a znázornění toku materiálu

### 7.3. Varianta 2

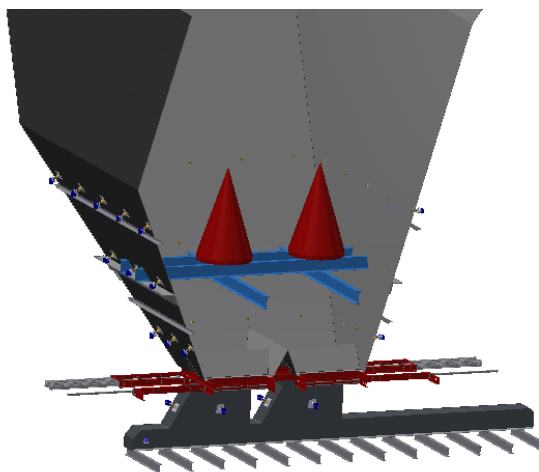
U varianty 2 obr. 35 a obr. 36 jsem se proto zaměřil na odlehčení hmotnosti materiálu nad výpustnými otvory a také na odstranění klenby. Po přidání pasivních prvků ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu, ve výšce kde se nám tvoří klenba, jsem dospěl k plynulejšímu toku materiálu ze zásobníku. Násypky nad redlerovými podavači jsem opatřil zkosenou částí ze strany toku materiálu z důvodu lepšího trhání materiálu a tím plynulejšímu proudění částic materiálu.



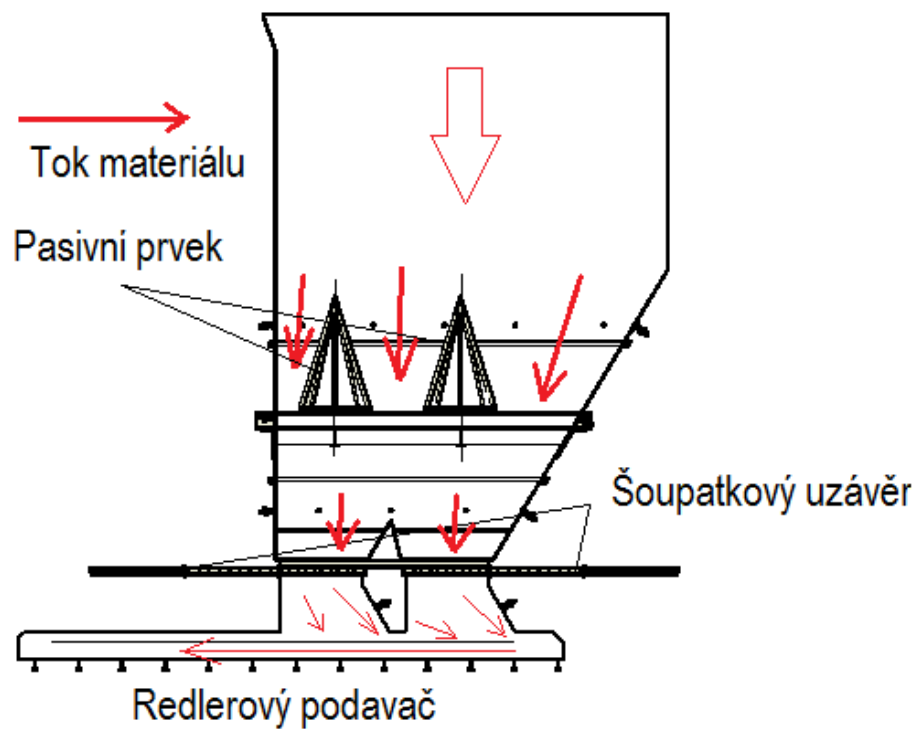
Obr. 355. Bokorys zásobníku a znázornění toku materiálu

### 7.4. Varianta 3

U varianty 3 jsem vycházel z koncepce předešlé varianty, jak znázorňuje obr. 38. Bylo použité čtyři obdélníkové výpustné otvory. Jako pasivní prvek jsem navrhnul svařovanou vestavbu s dvěma kužely. Pro snadnější tok a zamezení ulpívání materiálu na stěnách zásobníku jsem použil pulzní trysky. Pulzní trysky byly umístěny také na výsypkách pro redlerový podavač.



Obr. 366. 3D řez zásobníkem finální variantou



Obr. 377. Bokorys zásobníku a znázornění toku materiálu

## 7.5. Výběr varianty

Vybral jsem variantu 3 z důvodu nejlepšího toku materiálu a také díky pulzním tryskám nejmenšího ulpívání materiálu na stěnách zásobníku. Výhodou kuželové vestavby obr. 37 oproti vestavbě s rovnostranným jehlanem obr. 36 je ta, že u rovnostranného jehlanu byla velká pravděpodobnost tvoření klenby mezi pasivním prvkem a zadní stěnou zásobníku. U kuželové vestavby jsme tento problém odstranili.

## 8. Technologické výpočty

### -velikost výpustného otvoru

- hydraulický poloměr- propustnost výpustě zásobníku

-počítáme pro obdélníkovou výpust'

$$R = \frac{S'}{O}$$

$$R = \frac{b \cdot l}{2 \cdot (b + l)}$$

$$R = \frac{0,5 \cdot 1,5}{2 \cdot (0,5 + 1,5)}$$

$$\underline{\underline{R = 0,19m}}$$
(1)

- minimální hydraulický poloměr

$$R_{\min} = \frac{\tau_0 \cdot (1 + \sin \varphi)}{\gamma_s}$$

$$R_{\min} = \frac{8000 \cdot (1 + \sin 51)}{960 \cdot 9,81}$$

$$\underline{\underline{R_{\min} = 1,5m}}$$
(2)

b [m]	1								0,237	0,25	0,33	0,495
	0,9							0,218	0,225	0,236	0,31	0,445
	0,8							0,2		0,222	0,285	0,396
	0,7						0,175			0,205	0,259	0,347
	0,6					0,15				0,187	0,23	0,298
	0,5				0,125					0,166	0,2	0,348
	0,4			0,1						0,147	0,166	0,199
	0,3		0,075							0,115	0,13	0,149
	0,2	0,05								0,083	0,09	0,099
	0,1	0,025								0,145	0,047	0,045

0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	2	100
l [m]											

Obr. 38. Tabulka hydraulického poloměru na velikosti výpustného otvoru

- rozměry výpustného otvoru

$$b_{\min} = 2 \cdot R_{\min} \cdot \frac{1+i}{i} \cdot k_c \cdot d_{\max}$$

$$b_{\min} = 2 \cdot 1,5 \cdot \frac{1+3}{3} \cdot 1,8 \cdot 0,04$$

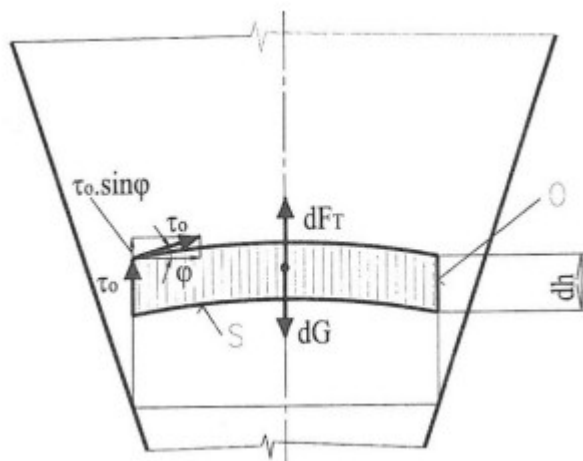
$$\underline{\underline{b_{\min} = 0,288m}}$$
(3)

-poměr stran výpustného otvoru

$$i = \frac{l}{b}$$

$$i = \frac{1,5}{0,5}$$

$$\underline{\underline{i = 3}}$$
(4)



Obr. 38. Rozložení sil v elementu materiálu ve výpustním otvoru

- kontrola průchod max. zrna

$$b_z = \frac{1+i}{i} \cdot c_z \cdot (d_{\max} + 0,08) \cdot \operatorname{tg} \psi_s$$

$$b_z = \frac{1+3}{3} \cdot 2,6 \cdot (0,04 + 0,08) \cdot \operatorname{tg} 23^\circ$$

$$\underline{\underline{b_z = 0,176m}}$$
(5)

$c_z=2,4$ - u netříděných materiálů

$c_z=2,6$ - u tříděných materiálů

- výtoková rychlost

$$v_0 = \lambda \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{R \cdot k_d \cdot k_0}{f \cdot k}}$$

$$v_0 = 0,4 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,19 \cdot 1 \cdot 1}{1,235 \cdot 0,12}} \quad (6)$$

$$\underline{\underline{v_0 = 2m \cdot s^{-1}}}$$

- koeficient vnitřního tření

$$f = \operatorname{tg} \varphi$$

$$f = \operatorname{tg} 51^\circ$$

$$\underline{\underline{f = 1,235}} \quad (7)$$

- koeficient sypnosti

$$k = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

$$k = \frac{1 - \sin 51}{1 + \sin 51} \quad (8)$$

$$\underline{\underline{k = 0,12}}$$

- výtok materiálu z výpustného otvoru

$$Q = 3,6 \cdot S' \cdot v_0 \cdot \rho_s \cdot \psi$$

$$Q = 3,6 \cdot 0,75 \cdot 2 \cdot 960 \cdot 0,8 \quad (9)$$

$$\underline{\underline{Q = 4147t \cdot h^{-1}}}$$

-  $\psi = 0,6 \div 0,9$

- plocha výpustného otvoru

$$S' = l \cdot b$$

$$S' = 1,5 \cdot 0,5 \quad (10)$$

$$\underline{\underline{S' = 0,75m^2}}$$

-Jansenova síla ve výpusti

$$F_1' = \frac{m \cdot v_0^2}{2 \cdot \Delta h}$$

$$F_1' = \frac{7200 \cdot 2^2}{2 \cdot 10}$$

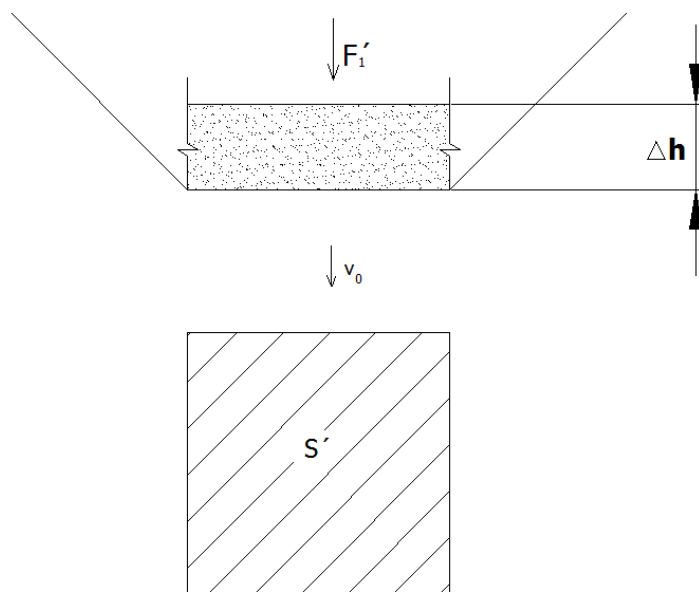
$$F_1' = 1440 N$$
(11)

- hmotnost zvoleného elementu

$$m = S' \cdot \Delta h \cdot \rho_s$$

$$m = 0,75 \cdot 10 \cdot 960$$

$$m = 7200 kg$$
(12)



Obr. 390. Jansenová síla ve výpustném otvoru

### Výpočet plochého horizontálního uzávěru (šoupátkový uzávěr)

- Jansenová síla do uzávěru

$$F_{1u}' = \frac{\gamma_s \cdot R}{f \cdot k} \cdot k_d \cdot k_0 \cdot S'$$

$$F_{1u}' = \frac{960 \cdot 9,81 \cdot 0,19}{1,235 \cdot 0,12} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,75$$

$$F_{1u}' = 9055 N$$
(13)



- Odpor proti otvírání

$$K = [F_{lu}' \cdot f_1 + (F_{lu}' + G) \cdot f_2] \cdot c$$

$$K = [9055 \cdot 0,5 + (9055 + 866) \cdot 0,2] \cdot 1,3$$

$$\underline{\underline{K = 8465 N}}$$
(14)

- hmotnost šoupátka

$$m_{šoup} = \rho_{oc} \cdot V$$

$$m_{šoup} = 7850 \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 0,015$$

$$\underline{\underline{m_{šoup} = 88,3 kg}}$$
(15)

- tíha šoupátka

$$G = m_{šoup} \cdot g$$

$$G = 88,3 \cdot 9,81$$

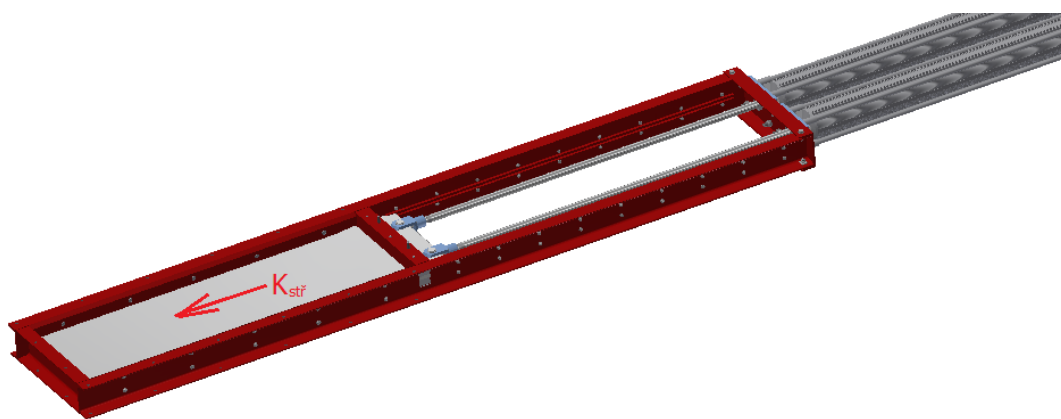
$$\underline{\underline{G = 866 N}}$$
(16)

- střední odpor proti otvírání

$$K_{stř} = \frac{F_1' \cdot f_1 + F_1' \cdot f_2}{2} + G \cdot f_2 + K_c$$

$$K_{stř} = \frac{9055 \cdot 0,5 + 9055 \cdot 0,2}{2} + 866 \cdot 0,2 + 1953$$

$$\underline{\underline{K_{stř} = 5295 N}}$$
(17)



Obr. 401. Model navrhnutého šoupátkového uzávěru

- síla z bezpečnostní přírážky pro nezahrnuté přírážky

$$K_c = K \cdot \frac{c-1}{c}$$

$$K_c = 8465 \cdot \frac{1,3-1}{1,3} \quad (18)$$

$$\underline{\underline{K_c = 1953N}}$$

- síla, která drží klenbu

$$F_{kl} = (\tau_0 + \tau_0 \cdot \sin \varphi) \cdot O \cdot \Delta h =$$

$$F_{kl} = (8000 + 8000 \cdot \sin 51) \cdot 2 \cdot (1,5 + 0,5) \cdot 10 \quad (19)$$

$$\underline{\underline{F_{kl} = 568686N}}$$

- Tíha klenby

$$G_{kl} = S' \cdot \Delta h \cdot \gamma_s$$

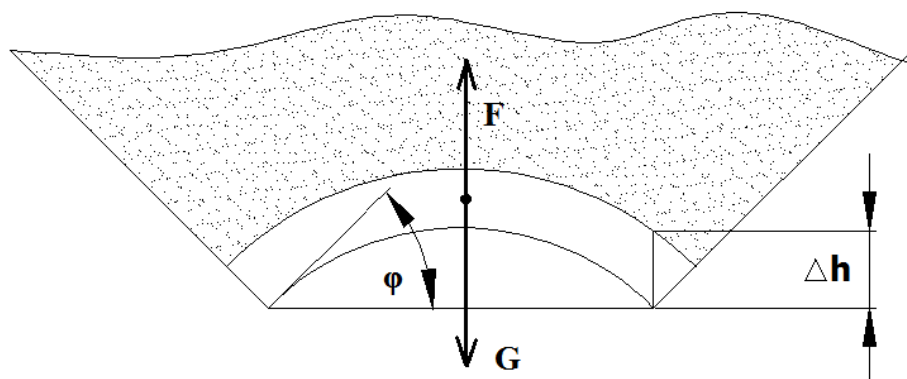
$$G_{kl} = 1,5 \cdot 0,5 \cdot 10 \cdot 960 \cdot 9,81 \quad (20)$$

$$\underline{\underline{G_{kl} = 70632N}}$$

- podmínka pro uvolnění klenby

$$G_{kl} \geq F_{kl} \quad (21)$$

$$70632 < 568686$$



Obr. 412. Rozložení sil působící na klenbu

Dle Jansenova modelu jsme zjistili výšku klenby v zásobníku

-konstanta vlačovacího mechanismu toku

$$Z_v = \frac{\pi \cdot D \cdot k \cdot f}{2 \cdot S'}$$

$$Z_v = \frac{\pi \cdot 0,70711 \cdot 0,12 \cdot 1,235}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,5} \quad (22)$$

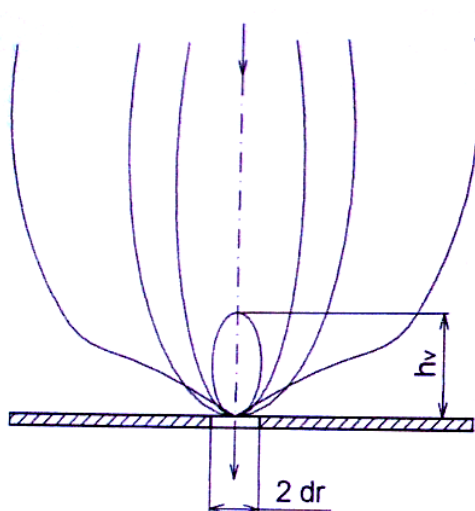
$$\underline{\underline{Z_v = 0,2195}}$$

-výška klenby

$$h_v = \frac{1}{Z_v}$$

$$h_v = \frac{1}{0,2195} \quad (23)$$

$$\underline{\underline{h_v = 4,55m}}$$



Obr. 423. Isolinie při toku materiálu podle Jansena

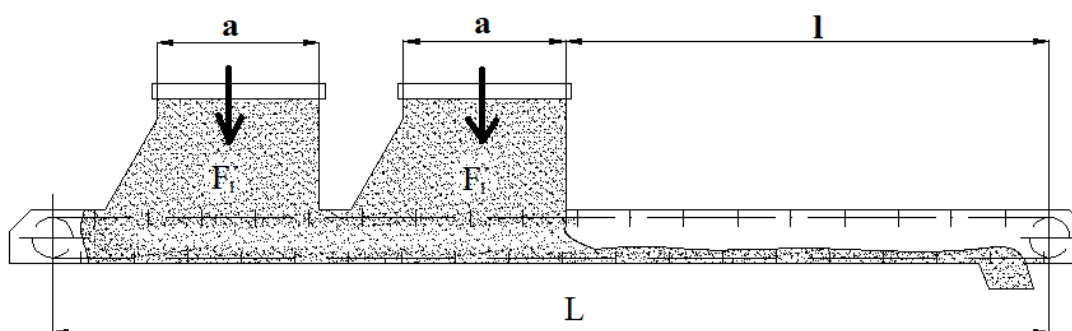
Pro uvolnění klenby a odlehčení tíhy materiálu nad výpustným otvorem jsem zvolil pasivní prvek ve tvaru jehlanu. Výška jehlanu je navržena tak aby zasahovala do vzniklé klenby a tím ji uvolnila.

Výpočet výkonu motoru pro redlerový podavač P

$$P = 1,1 - 1,3 \cdot \frac{K_r \cdot v}{1000 \cdot \eta} \quad (24)$$

$$v = 0,1 - 0,5 \text{ ms}^{-1}$$

$$\eta = 0,94$$



Obr. 434. Řez redlerovým podavačem

Celkový odpor proti pohybu  $K_r$

$$K_r = K_1 + K_2 + K_3 \quad (25)$$

Odpor ve vedení řetězu  $K_1$

$$\begin{aligned} K_1 &= f_3 \cdot 2 \cdot G_2 \\ K_1 &= 0,25 \cdot 2 \cdot 673,1 \\ K_1 &= 336,55 \text{ N} \end{aligned} \quad (26)$$

$$f_3 = 0,25$$

Tíha jedné větve řetězu včetně hřebel

$$\begin{aligned} G_2 &= L \cdot m_r \cdot g \\ G_2 &= 9,4 \cdot 7,3 \cdot 9,81 \\ G_2 &= 673,1 \text{ N} \end{aligned} \quad (27)$$

Odpor z tření na boční vedení a dně podavače  $K_2$

$$K_2 = f_4 \cdot [\gamma_s \cdot h_2^2 \cdot k \cdot (l + 2 \cdot a) + (F_1' + b \cdot h \cdot l \cdot \gamma_s)]$$

$$K_2 = 0,6 \cdot [960 \cdot 9,81 \cdot 0,1^2 \cdot 0,12 \cdot (6,4 + 2 \cdot 1,5) + (5083 + 0,5 \cdot 0,22 \cdot 6,4 \cdot 960 \cdot 9,81)] \quad (28)$$

$$\underline{\underline{K_2 = 7091,5 N}}$$

$$f_2 = 0,45-0,7$$

$$h_2 = 100 \text{ mm}$$

$$k = 0,12$$

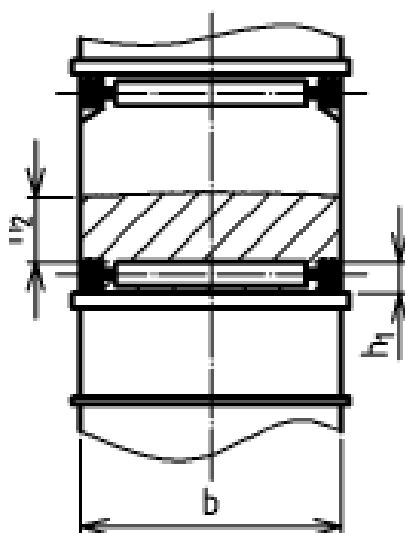
$$b = 500 \text{ mm}$$

$$h = 220 \text{ mm}$$

$$l = 6400 \text{ mm}$$

$$c_1 = 0,6-0,95$$

$$f = 1,235$$



Obr. 45. Výška materiálu a tažného elementu

Odpor z trhání materiálu  $K_3$

$$K_3 = (F_1' \cdot f + \tau_0 \cdot 2 \cdot S') \cdot c_1$$

$$K_3 = (5083 \cdot 1,235 + 8000 \cdot 2 \cdot 0,75) \cdot 0,7 \quad (29)$$

$$\underline{\underline{K_3 = 12794 N}}$$

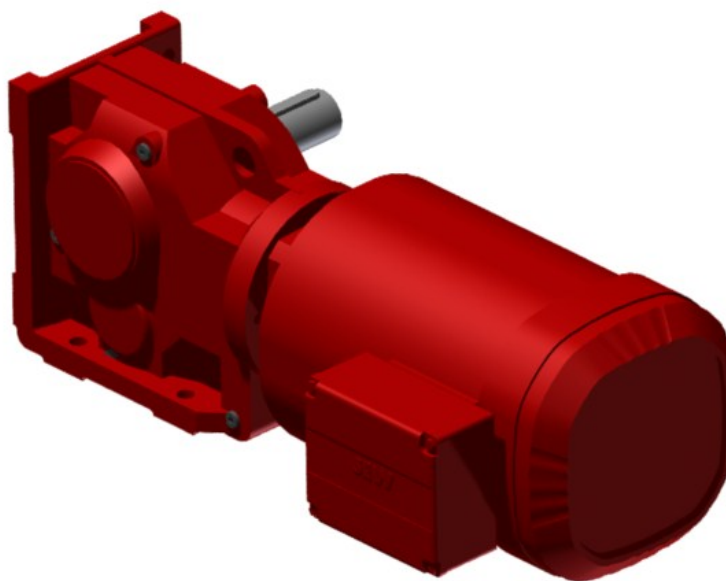
Celkový odpor proti pohybu podavače

$$\begin{aligned}K_r &= K_1 + K_2 + K_3 \\K_r &= 336,55 + 7091,5 + 12794 \\K_r &= 20222N\end{aligned}\tag{30}$$

Výkon elektromotoru

$$\begin{aligned}P &= 1,1 - 1,3 \cdot \frac{K_r \cdot v}{1000 \cdot \eta} \\P &= 1,2 \cdot \frac{20222 \cdot 0,3}{1000 \cdot 0,94} \\P &= 7,7kW\end{aligned}\tag{31}$$

Volba motoru K77DRE160MC4 s kuželočelní převodovkou od firmy SEW-eurodrive s výkonem P=11 kW a převodovým poměrem i= 20,25

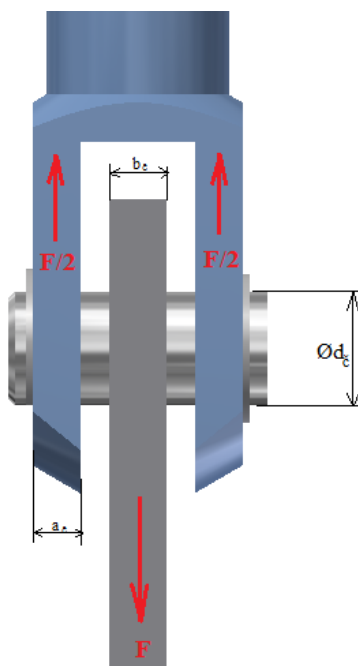


*Obr. 46. Motor s kuželočelní převodovkou (SEW-eurodrive)*

## 9. Konstrukční výpočet

### 9.1. Výpočet čepu

Průměr čepu  $d_c = 20 \text{ mm}$



Obr. 47. Čepový spoj

Výpočet čepu na ohyb

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= \frac{M_o}{W_o} = \frac{4 \cdot F \cdot (2 \cdot a + b)}{\pi \cdot d^3} \leq \sigma_D \\ \sigma_0 &= \frac{4 \cdot 8465 \cdot (2 \cdot 12,5 + 15)}{\pi \cdot 20^3} \quad (32) \\ \sigma_0 &= 53 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$53 \text{ MPa} < 70 \text{ MPa} \rightarrow$  Podmínka splněna

Výpočet čepu na střih

$$\begin{aligned}\tau_s &= \frac{F}{S_\epsilon} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d_\epsilon^2}{4} \cdot 2} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d_\epsilon^2} \leq \tau_D \\ \tau_s &= \frac{2 \cdot 8465}{\pi \cdot 20^2} \\ \tau_s &= \underline{\underline{13,47 MPa}}\end{aligned}\tag{33}$$

$13,47 MPa < 40 MPa \rightarrow$  Podmínka splněna

Redukované napětí

$$\begin{aligned}\sigma_{red} &= \sqrt{(\sigma_o^2 + 4 \cdot \tau_s^2)} \leq \sigma_D \\ \sigma_{red} &= \sqrt{(53^2 + 4 \cdot 13,47^2)} \\ \sigma_{red} &= \underline{\underline{59,4 MPa}}\end{aligned}\tag{34}$$

$59,4 MPa < 70 MPa \rightarrow$  Podmínka splněna

Kontrola čepu na otlačení

$$\begin{aligned}p_{\epsilon 1} &= \frac{F}{d_\epsilon \cdot 2 \cdot a_\epsilon} \leq p_D \\ p_{\epsilon 1} &= \frac{8465}{20 \cdot 2 \cdot 12,5} \\ p_{\epsilon 1} &= \underline{\underline{16,93 MPa}}\end{aligned}\tag{35}$$

$16,93 MPa < 65 MPa \rightarrow$  Podmínka splněna

$$\begin{aligned}p_{\epsilon 2} &= \frac{F}{d_\epsilon \cdot b_\epsilon} \leq p_D \\ p_{\epsilon 2} &= \frac{8465}{20 \cdot 15} \\ p_{\epsilon 2} &= \underline{\underline{28,21 MPa}}\end{aligned}\tag{36}$$

$28,21 MPa < 65 MPa \rightarrow$  Podmínka splněna



U navrhnutého čepu o průměru  $d_{\text{č}}=20\text{mm}$  byly splněny všechny konstrukční podmínky. Z důvodu vůle mezi čelistí a šoupátkem byly do mezery umístěny vymešovací podložky.

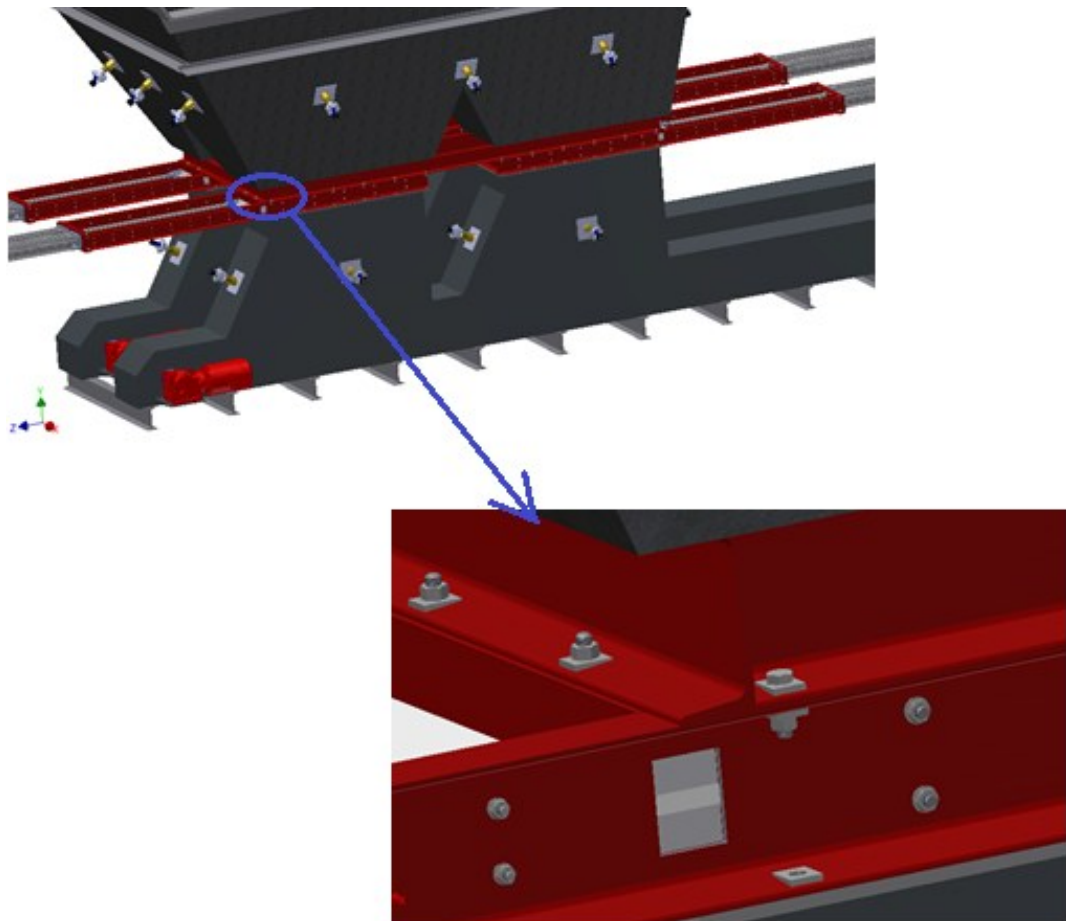
## 9.2. Výpočet šroubu pro šoupátkový uzávěr

Volím počet šroubů  $i_{\text{s}}=18$

Síla do uzávěru  $F'_{1u}=9055\text{N}$

Materiál šroubu volím 11SMnPb37+C

$Re=430\text{MPa}$



Obr. 448. Umístění šroubového spoje

Výpočet osově síly v jednom šroubu

$$F_0 = 1,2 \cdot \frac{F'_{lu}}{i_s}$$

$$F_0 = 1,2 \cdot \frac{9055}{18}$$

$$F_0 = 603,66 N$$
(37)

Výpočet předběžného průměru šroubu

$$\sigma_t = \frac{F_0}{S} = \frac{F_0}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} \leq \sigma_D$$

$$\sigma_t = \frac{F_0}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} \leq \frac{R_e}{k_s}$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_0 \cdot k_s}{\pi \cdot R_e}}$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 603,33 \cdot 4}{\pi \cdot 430}}$$

$$d_3 = 7,15 mm$$
(38)

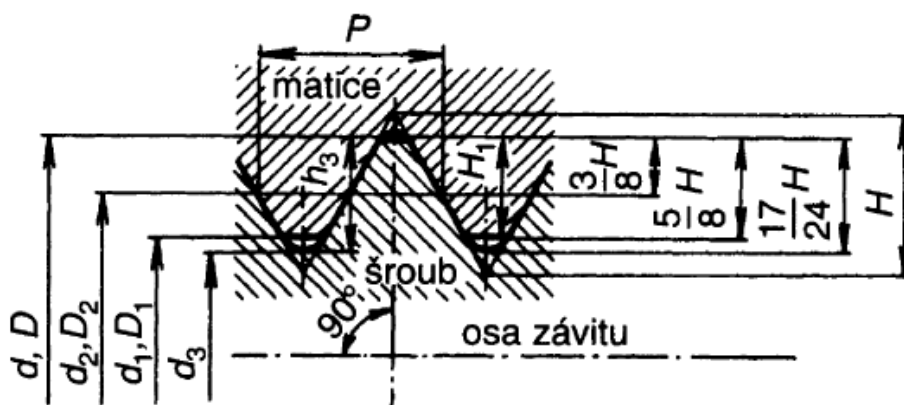
-ze strojírenských tabulek volen šroub

**M12 x 1,75**

$P_z = 1,75 \text{ mm}$

$d_3 = 9,853 \text{ mm}$

$d_2 = 10,863 \text{ mm}$



Obr. 49. Geometrie metrického závitu

Napětí v tahu/tlaku

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \frac{F_0}{S} = \frac{4 \cdot F_0}{\pi \cdot d_3^2} \\ \sigma_t &= \frac{4 \cdot 603,66}{\pi \cdot 9,853^2} \\ \sigma_t &= \underline{\underline{8MPa}}\end{aligned}\tag{39}$$

Úhel stoupání závitu

$$\begin{aligned}\psi_z &= \arctg \frac{P_z}{\pi \cdot d_2} \\ \psi_z &= \arctg \frac{1,75}{\pi \cdot 10,863} \\ \psi_z &= \underline{\underline{3^\circ}}\end{aligned}\tag{40}$$

Redukovaný třecí úhel

$$\begin{aligned}\varphi'_z &= \arctg \frac{f_z}{\cos \frac{\alpha}{2}} \\ \varphi'_z &= \arctg \frac{0,2}{\cos 30^\circ} \\ \varphi'_z &= \underline{\underline{13^\circ}}\end{aligned}\tag{41}$$

Napětí v krutu

$$\begin{aligned}\tau_k &= \frac{M_k}{W_k} = \frac{F_0 \cdot \tg(\psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}} \\ \tau_k &= \frac{603,66 \cdot \tg(3^\circ + 13^\circ) \cdot \frac{10,863}{2}}{\frac{\pi \cdot 9,853^3}{16}} \\ \tau_k &= \underline{\underline{5MPa}}\end{aligned}\tag{42}$$

Redukované napětí

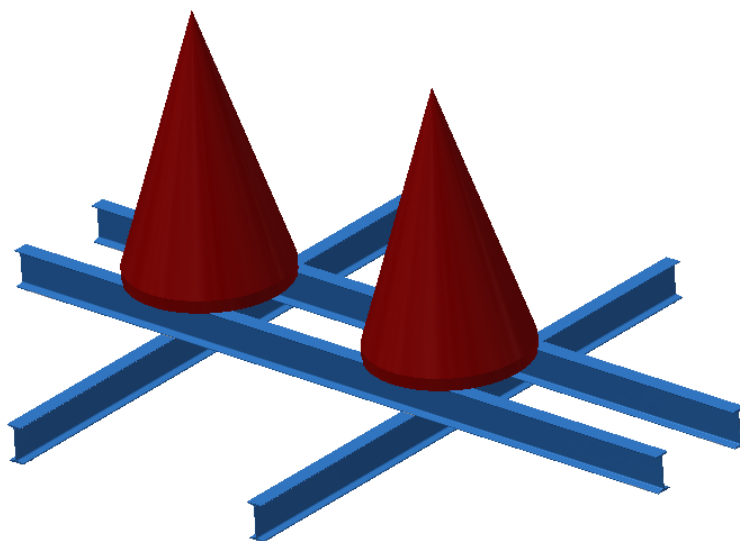
$$\begin{aligned}\sigma_{red} &= \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau_k^2} \\ \sigma_{red} &= \sqrt{8^2 + 4 \cdot 5^2} \\ \sigma_{red} &= \underline{\underline{12,8MPa}}\end{aligned}\tag{43}$$

Podmínka

$$\begin{aligned}\sigma_{red} &\leq \sigma_D \\ \sigma_{red} &\leq \frac{R_e}{k_s} \\ 12,8 &\leq \frac{430}{4} \\ \underline{12,8MPa < 107,5MPa}\end{aligned}\tag{44}$$

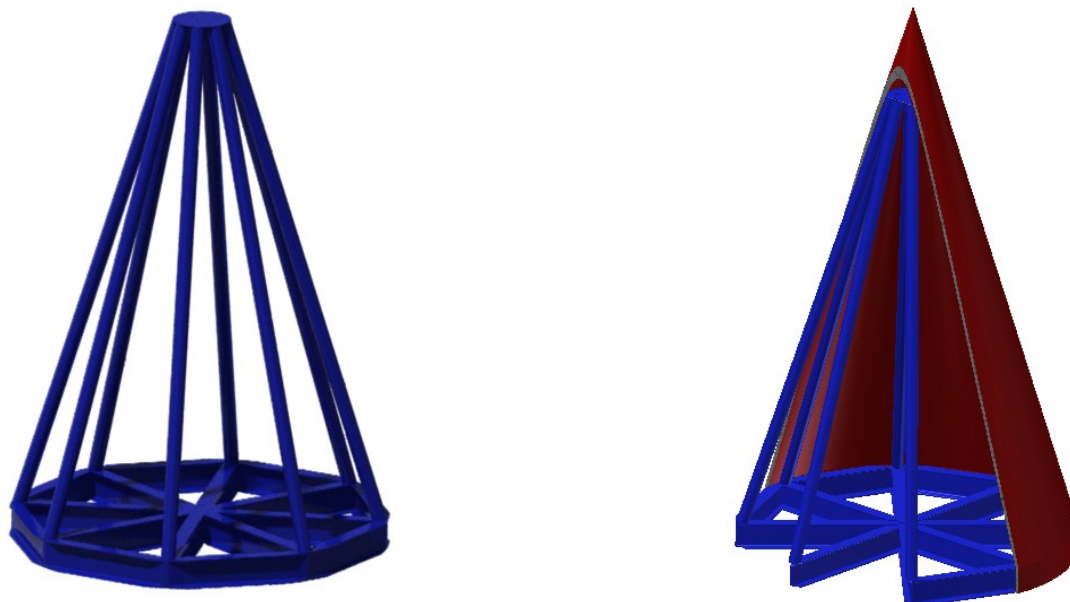
Podmínka splněna → šroub **M12x1,75** vyhovuje

## 10. Pasivní vestavba zásobníku



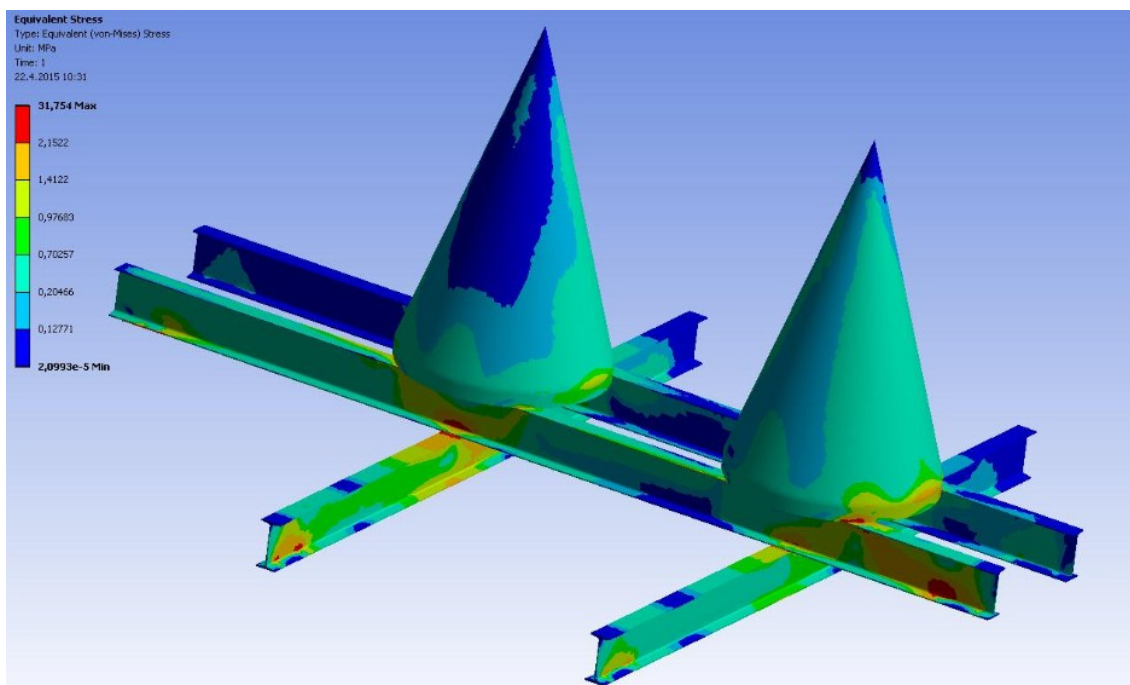
*Obr. 50. Svařovaná vestavba pasivního prvku*

Byl navrhnut pasivní prvek ve tvaru kužele. Průměr podstavy m 1300 mm sklon stěny v °řezu je 35°. Plášť jehlanu tvoří plech, který je navařený na vnitřní svařované konstrukci. Podstava konstrukce je s I profilu sestavené do osmi-úhelníku a konstrukce je dále tvořená s dutých tyčových profilů kruhového průřezu.



*Obr. 45. Svařovaná konstrukce kuželu pasivního prvku*

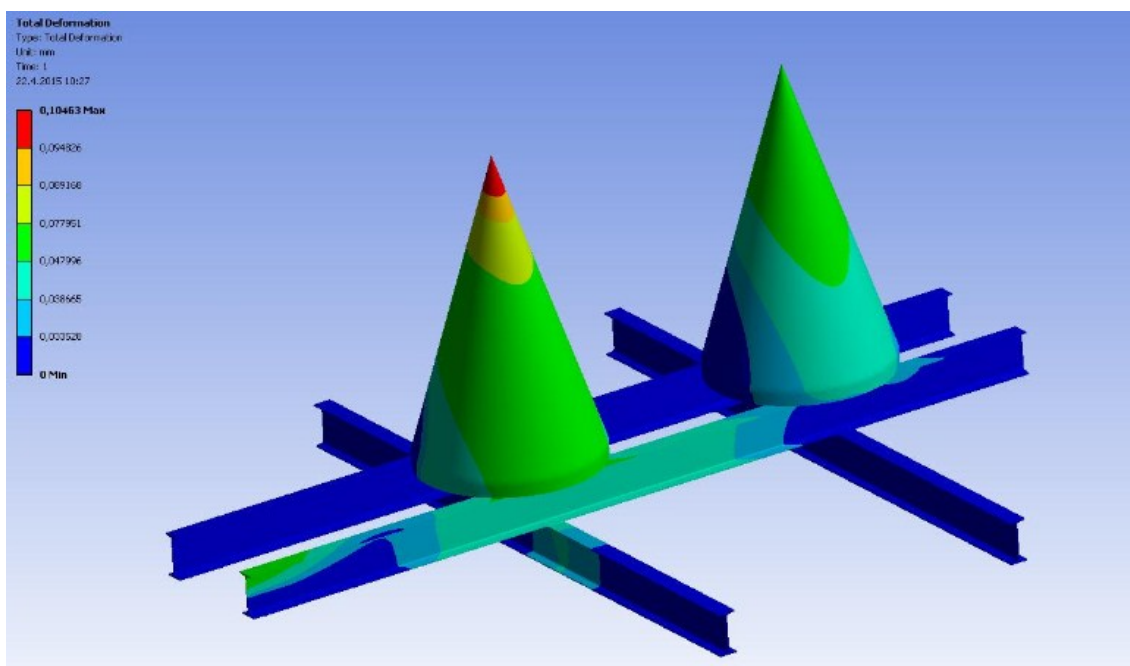
Maximální zatížení na svary bylo provedeno způsobem, kdy svary byly v úloze zafixovaný tak, aby znázorňovaly nepohyblivý spoj. Maximální zatížení na svar bylo simulováno na 31,7 MPa.



*Obr. 462. Maximální zatížení ( Ansys Workbench 15.0)*

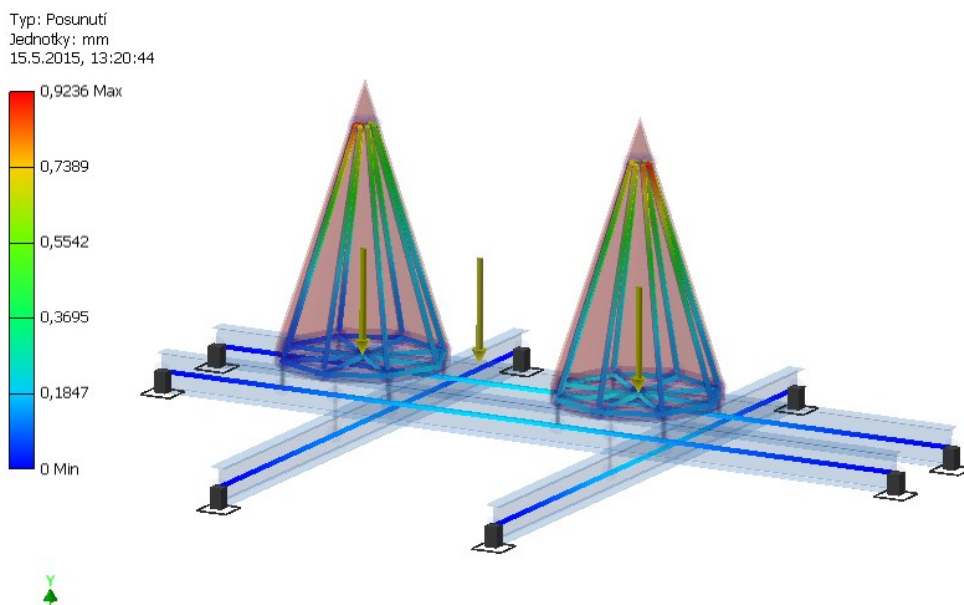
Oba jehlany jsou usazeny a navařené na konstrukci s I profilů, která je dále navařená na stěny zásobníku a na svařovaný prstenec okolo zásobníku. Prstenec nám taky slouží jako jedna z příčných výztuh zásobníku. Svařovanou vestavbu jsem kontroloval pomocí programu Ansys Workbench 15.0 na maximální zatížení. Tlak na jehlany jsme brali tak, že působí všude stejně po obvodu pláště.

Maximální deformace jehlanu je zanedbatelná a vzniká na špičce jehlanu. Deformace špičky činí pouhých 0,104 mm. V praxi navíc nedocílíme při svaření pláště dokonalou špičku.



Obr. 53. Maximální deformace ( Ansys Workbench 15.0)

Také jsem provedl analýzu na maximální průhyb hlavních nosníků, kde maximální napětí vychází 14,2 MPa a maximální průhyb je 0,92 mm.



Obr. 54. Maximální průhyb nosníků ( Inventor 2013)

## 11. Technický popis

V diplomové práci jsem zpracoval rekonstrukci zásobníku na černé uhlí a optimalizaci toku materiálu v elektrárně Opatovice. Byl použit původní tvar zásobníku z důvodu zachování množství uskladněného materiálu. Materiál je uskladněn v zásobníku dále přes šoupátkový materiál dodáván na redlerový podavač, který podává materiál do fluidního kotle.

Z důvodu optimalizace toku materiálu ze zásobníku jsem navrhnul pasivní vestavbu v zásobníku, která je umístěna ve výšce tvoření klenby a zároveň jeho průměr je navrhnut tak aby odlehčili tíhu materiálu nad výpustným otvorem. Dále jsou na zásobníku umístěny pulzní trysky z toho důvodu, aby neulpíval materiál na stěnách zásobníku.

Pod zásobníkem jsem umístil pneumatický šoupátkový uzávěr na každý výpustný otvor. Uzávěr je připevněn šroubem a maticí na ocelovou konstrukci přivařenou k zásobníku. Šoupátkový uzávěr je ovládán dvěma pneumatickými válci z důvodu maximálního zatížení na uzávěr a z důvodu, aby nedošlo k přičení desky uzávěru.

Redlery jsou umístěny přes násypku pod zásobníkem a jsou položeny na I profilech. Násypky redlerových podavačů jsou upraveny. Jejich jedna strana je zkosená z důvodu lepšího trhání a materiálu a také jsou vybaveny pulzními tryskami. Materiál je v redleru dopravován na horní větev a poté přepadává do spodní větve a dále přes celou délku podavače dopravován do fluidního kotle.

Zásobník je v horní části zabudován do betonové vestavby a ve spodní části stojí na redlerech, které jsou umístěny na I profilech a na podlaze.



## 12. Závěr

Na začátku diplomové práce jsem zpracoval rešerši, která popisuje základní rozdělení zásobníku. Pokračování první části diplomové práce je srovnání a popis hotového a jádrového toku a také problémy toku materiálu. Jako poslední část rešerše je rozdělení, popis a ukázka aktivních a pasivních prvků zásobníků.

V druhé části jsem se zaměřil na měření mechanicko-fyzikálních vlastností reprezentativního vzorku určeného ke skladování v daném zásobníku. Měřil jsem v laboratoři sypkým hmot VŠB-TU úhel vnitřního tření, úhel vnější tření a maximální velikost zrna.

Po změření materiálu jsem se mohl soustředit na varianty řešení, kterých vzniklo postupným odstraňováním potenciálních problémů toku materiálu celkem 3. V závěru kapitoly byla vybrána nejlepší varianta a navrhnutí tvaru a umístění pasivního prvku v zásobníku. Pasivní prvek jsem také zkontroloval pomocí programu Ansys na maximální napětí a deformaci.

Z důvodu zachování tvaru a objemu zásobníku jsem se u technologických výpočtů zaměřil na tvar a velikost výpustných otvorů, dále na velikost Jansenovy síly ve výpusti a na uzávěr, abych mohl dále navrhnout šoupátkový uzávěr, který by splňoval všechny parametry. Vypočetl jsem také výkon redlerového podavače a následně vyhledal a zakomponoval do sestavy motor s kuželočelní převodovkou od firmy SEW-eurodrive. Při konstrukčních výpočtech byly navrženy šrouby, které drží šoupátkový uzávěr se svařenou konstrukcí, která je přivařena k zásobníku.

K diplomové práci jsou také přílohy v podobě sestavných a výrobních výkresů jednotlivých částí.

### 13. Použitá literatura

- [1] PEŠAT, Zdeněk. *Manipulace s materiálem v hutích: určeno pro posl. 4. roč. fak. strojní*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1992, 165 s. ISBN 80-7078-107-6.
- [2] POLÁK, Jaromír a Aleš SLÍVA. *Dopravní a manipulační zařízení III*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 133 s. ISBN 80-248-0963-x.
- [3] ZEGZULKA, Jiří. *Mechanika sypkých hmot*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, 186 s. ISBN 80-248-0699-1.
- [4] ENSTAD, G., G.: *A Novel Theory on the Arching and Doming in Mass Flow Hoppers*. Doct. Thesis, Bergen, 1981
- [5] STRUSCH, J., SCHWEDES, J.: *The Use of Slice Element Methods for Calculating Insert Loads*. Bulk Solids&Handling No. 3, 1994
- [6] J.LEINVEBER, J.ŘASA, P.VÁVRA; *Strojírenské tabulky*. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-164-6
- [7] [www.mosasolution.com](http://www.mosasolution.com)
- [8] [www.stranskyapetrzik.cz](http://www.stranskyapetrzik.cz)
- [9] [www.zking.cz](http://www.zking.cz)
- [10] [www.zeta-zr.cz](http://www.zeta-zr.cz)
- [11] [www.prumyslove-vibratory.cz](http://www.prumyslove-vibratory.cz)
- [12] [www.has.cz](http://www.has.cz)
- [13] [www.ticentrum.cz](http://www.ticentrum.cz)
- [14] [www.beltplast.cz](http://www.beltplast.cz)
- [15] [www.aventics.com](http://www.aventics.com)

## 14. Seznam příloh

### Výkresy:

Sestavný výkres – Zásobník na uhlí	SN2KID01-00
Sestavný výkres – Zásobník s vestavbou	SN2KID01-01
Sestavný výkres – Svařovaná vestavba	SN2KID01-02
Výrobní výkres – Vnitřní konstr. kužele	SN2KID01-03
Výrobní výkres – Tenkostěnná trubka	SN2KID01-04
Výrobní výkres – Vrchní plech	SN2KID01-05
Výrobní výkres – I profil vnitřní 1	SN2KID01-06
Výrobní výkres – I profil vnitřní 2	SN2KID01-07
Výrobní výkres – I profil vnitřní 3	SN2KID01-08
Výrobní výkres – U profil vnější	SN2KID01-09
Výrobní výkres – Plášť jehlanu	SN2KID01-10

Datový nosič

Příloha A